

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Modelování proudění vzduchu v odlučovači popílku
Modeling of Airflow in the Fly Ash Separator

Student:

Bc. Vojtěch Janík

Vedoucí:

Ing. Adam Bureček, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Vojtěch Janík

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace:

16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma:

Modelování proudění vzduchu v odlučovači popílku
Modeling of Airflow in the Fly Ash Separator

Zásady pro vypracování:

Modelujte proudění vzduchu v odlučovači popílku.

1. Definujte matematický model proudění.
2. Simulujte proudění vzduchu pro danou geometrii odlučovače popílku a okrajové podmínky.
3. Navrhněte vhodnou úpravu geometrie odlučovače popílku dle podmínek zadavatele.
4. Simulujte proudění vzduchu v upravené geometrii odlučovače popílku.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění - Fluent, CFX*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.,
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.

KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2011, 173 s., ISBN 978-80-248-2491-8.

BOJKO, M. *Návody do cvičení Modelování proudění - FLUENT*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008, 141 s., ISBN 978-80-248-1909-9.

ANSYS, Inc. *Fluent 13.0 - ANSYS FLUENT Theory Guide*. 2010.

BOJKO, M. *3D proudění - ANSYS FLUENT*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012, 314 s.,
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/3D-Bojko.pdf>> ISBN 978-80-248-2607-3.

MAMICA, M. *Modelování proudění v článku kotle*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, 59 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Adam Bureček, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19.5.2014

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem celou diplomovou práci, včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 19.5.2014


.....
Vojtěch Janík

Vyhlídalova 31

Kravaře

747 21

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Janík, V. *Modelování proudění vzduchu v odlučovači popílku: Diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2014, 57 s

Diplomová práce se zabývá řešením, jak vylepšit odlučování popílku vznikajícího při spalování v lokálním topeništi. Snahou je optimalizace tvaru odlučovače tak, aby bylo docíleno nižší emisivity topeniště a zároveň nedocházelo k větším tlakovým ztrátám oproti zadání. Výpočtové simulace jsou prováděny softwarem Ansys Fluent. Navrženo a řešeno je několik různých geometrií. Pro tyto navržené geometrie budou provedeny simulace proudění. Dále budou pro porovnání řešeny proudění s příměsí pevných částic, které simulují pohyb popílku.

ANNOTATION OF THESIS

Janík, V. *Modeling of Airflow in the Fly Ash Separator: Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2014, 57 s

This diploma thesis describes solution, how to improve separation of ash, which is create by combustion in local heating. The effort is to optimize the shape of the separator, which will make lower emissivity and will not make bigger pressure loss compared to the assignment. Simulations are made in Ansys Fluent software. There is designed and solved several different geometry. For this designed geometry will make flow simulations. And next will solve flow with solids for compared that simulate movement of the fly ash.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek	9
1. Úvod do problematiky odprašování.....	11
2. Metody odlučování popele.....	12
2.1. Mechanické odlučovače.....	12
2.2. Elektrostatické odlučovače	16
2.3. Filtry.....	17
3. Popílek	19
3.1 Vlastnosti popílku	19
3.2 Vznik popílku	19
4. Základní zákony proudění plynů	20
4.1 Zákon zachování hmotnosti	20
4.2. Zákon zachování energie	21
4.3. Zákon zachování hybnosti	22
5. Turbulentní proudění	23
5.1. Teorie turbulence	24
5.2. Boussinesquova hypotéza	25
5.3. Statistické modely turbulence	26
5.4. Statistické modely turbulence	27
6. Vícefázové modely	28
6.1 Vícefázové modely obecně.....	28
6.2. Přístupy k modelování vícefázového proudění.....	29
6.2.1. Euler – Lagrangeův přístup.....	29
6.2.2. Euler – Eulerův přístup	30
6.3. Vícefázové matematické modely	30
6.3.1 Trajektorie pohybu pevných částic v plynu	31
6.3.2 Definování zdroje diskrétní fáze.....	32
7. Simulace proudění vzduchu v odlučovači	35

7.1 Stanovení okrajových podmínek	35
7.2 Zadaná geometrie.....	36
7.3 Příprava modelu	37
7.4 Vytvoření výpočetní sítě.....	38
7.5 Nastavení hodnot v programu Fluent.....	40
7.5.1 Nastavení záložky General	41
7.5.2 Nastavení záložky Models	41
7.5.3 Nastavení záložky BoundaryConditions.....	44
7.5.4 Nastavení záložky Solution Controls.....	46
7.5.5 Nastavení záložky Solution Initialization	47
7.5.6 Spuštění simulace	47
8. Vyhodnocení výsledků	48
8.1 Grafické porovnání výsledných hodnot ze simulací.....	50
Závěr	54
LITERATURA	55
Přílohy.....	57

Seznam použitých symbolů a značek

v	rychlost	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v_x, v_y, v_z	složky rychlosti	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
t	čas	$[\text{s}]$
c	měrná tepelná kapacita	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
c_p	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
F	síla	$[\text{N}]$
a	zrychlení	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
F_s	setrvačná síla	$[\text{N}]$
F_m	hmotnostní síla	$[\text{N}]$
F_p	tlaková síla	$[\text{N}]$
F_t	smyková síla	$[\text{N}]$
ρ	hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
μ	dynamická viskozita	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
ε	rychlost disipace	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}]$
x	kartézská souřadnice	$[\text{m}]$
y	kartézská souřadnice	$[\text{m}]$
z	kartézská souřadnice	$[\text{m}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[1]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$
π	Ludolfovo číslo	$[1]$
τ	smykové napětí	$[\text{Pa}]$
σ	normálové napětí	$[\text{Pa}]$
S_z	zdrojový člen průtoku	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
ν_t	turbulentní viskozita	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
ν	kinematická viskozita	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
ω	specifická rychlost disipace	$[\text{s}^{-1}]$
C_μ	empirická konstanta	$[1]$
$\tau_{i,j}$	tensor Reynoldsových napětí	$[\text{Pa}]$
τ_t	turbulentní napětí	$[\text{Pa}]$
u	střední rychlost	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
l	délkové měřítko	$[\text{m}]$
Q_m	hmotnostní průtok	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$

c_{max}	koncentrace prachu	[kg.m ³]
u_p	rychlost částic, řešená integrací podle času	[m.s ⁻¹]
ρ_p	hustota částic	[kg.m ⁻³]
Y_D	hmotnostní zlomek částic	[1]
\bar{D}	střední hodnota průměru	[m]
n	koeficient šíření částic	[1]
F_D	síla hydrodynamického odporu	[N]
F_x	vnější objemová síla	[N]
a_1, a_2, a_3	konstanty pro určitý rozsah Reynoldsova čísla	[1]

1. Úvod do problematiky odprašování

Při spalování paliv a i jiných činnostech (drcení, mletí) vznikají prašné emise - tuhé znečišťující látky. Vedle chemicky působících složek jsou tuhé emise druhou významnou složkou celkové emise škodlivin. Na rozdíl od mnoha případů plyných škodlivin je odstranění tuhých příměsí technicky běžně schůdné, poněvadž existuje dostatek účinných metod a úspěšné řešení je jen otázkou výběru optimálního postupu [1].

Určení optimálního postupu zachycení tuhých příměsí v určitém konkrétním případě závisí především na jejich pokud možno dokonalé charakterizaci. Tuhé částice obecně představují velice pestrý soubor, jehož vlastnosti mohou být v mnoha směrech velmi rozdílné. Při spalování tuhých paliv (uhlí) se popeloviny mění na popel. Tento popel se pak skládá ze strusky, která odpadá pod rošt ohniště a úletového popílku, který je unášen spaliny komínem ven.

Podíl popelovin přecházejících do spalin závisí především na technologii spalování a činí od 30% (cyklonové kotle) po více než 90% v případě cirkulačních fluidních kotlů. Práškové kotle před odloučením popílku generují spaliny s obsahem cca 40 g/m^3 , zákonné emisní limity jsou v rozmezí $50 - 250 \text{ mg/m}^3$.

Z hlediska odlučování je nejdůležitějším parametrem velikost částic, která se může pohybovat ve velmi širokých mezích, prakticky od $0,01$ do $1000 \text{ }\mu\text{m}$. Odlučovače jsou schopny zachytit částice velikosti jednotek mikrometrů, menší částice tvoří aerosoly - polétavý popílek.

Zařízení pro zachycování tuhých příměsí pracují na různých principech, s různou účinností a s různou vhodností použití pro jednotlivé druhy prachů [1].

Cíl práce

V této práci bude řešena simulace proudění spalin v geometrii, kterou poskytl zadavatel. Po sestavení matematického modelu a jeho matematické simulaci, budou navrženy optimalizace oproti zadané geometrii. Pro tyto návrhy budou rovněž vytvořeny a simulovány matematické modely. Sledovat se bude hmotnostní zlomek částic, které zůstaly v tvarovce a částic, které do tvarovky byly vpuštěny. Dále tlaková ztráta mezi vstupem a výstupem počítané oblasti a rychlostní pole. V závěru budou hodnoty od všech matematických simulací porovnány a posouzeny.

2. Metody odlučování popele

Z hlediska principu jejich funkce je možné tato zařízení rozdělit na:

- 1) mechanické odlučovače
- 2) elektrostatické odlučovače
- 3) filtry

2.1. Mechanické odlučovače

Odlučovače je možno dělit podle fáze na suché a mokré.

Suché mechanické odlučovače

Mechanické odlučovače pracují na principu využití gravitační nebo setrvačné síly k oddělení tuhých částic na základě jejich odlišné měrné hmotnosti od měrné hmotnosti plynu. Do této skupiny patří celá řada odlučovačů s mezí odlučivosti pohybující se v rozmezí 3 – 30 μm , z nichž většina je již přežilá vzhledem k malé účinnosti. Mají poměrně malou účinnost, nicméně vírové odlučovače jsou v současné době nejrozšířenějším odlučovačem vůbec [18].

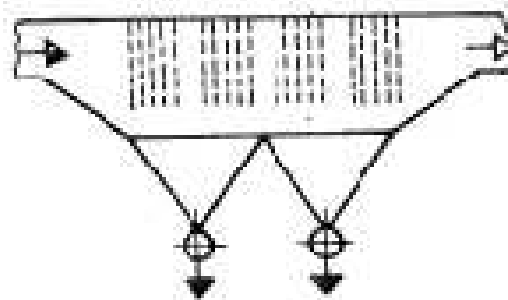
Celková odlučivost (účinnost) odlučovače je definována jako podíl hmotnosti odloučených částic v odlučovači vůči původní hmotnosti částic přivedených do odlučovače nosným plynem ve stanoveném časovém úseku, za určitých podmínek průtoku, tlaku, teploty a relativní vlhkosti plynu na vstupu do odlučovače.

Účinnost odlučování může být stanovena:

- Současným měřením vstupní a výstupní hmotové koncentrace a vstupního a výstupního objemového průtoku znečištěného plynu při skutečných provozních podmínkách.
- Jako garantovaná účinnost stanovená při přijímacích a předávacích zkouškách.
- Jako účinnost odpovídající garantované výstupní koncentraci a předpokládané průměrné vstupní koncentraci.

Usazovací komory

Jsou nejjednodušším typem mechanického odlučovače vůbec. Princip jejich funkce spočívá v rozšíření profilu potrubí a tím snížení rychlosti plynu. Při snížené rychlosti padají částice prachu vlivem gravitace do spodní části komory, odkud jsou odváděny. Tento efekt se projevuje pouze u částic o velikosti řádově stovek μm . Pro menší částice by komory vycházely neúnosně velké a částice, které podléhají turbulentní difúzi (cca pod 10 μm) nelze odloučit vůbec [18]. Na obr. Je znázorněna klasická usazovací komora.



Obr. 2.1 – Usazovací komora s vloženými přepážkami

Pro jejich použití hovoří zejména to, že jsou:

- jednoduché konstrukce
- provozně spolehlivé
- nenáročné na obsluhu a údržbu
- mají nižší pořizovací náklady
- nižší spotřeba energie a jsou vhodné i pro vysoké teploty plynu.

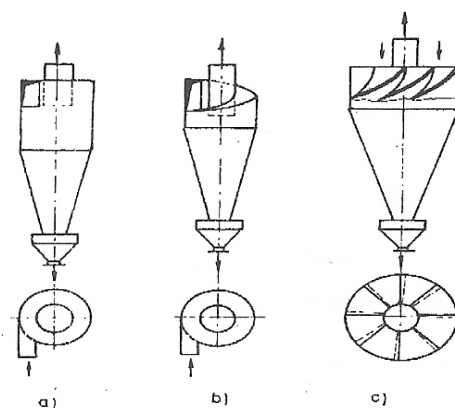
Nevýhodou těchto odlučovačů je:

- nízká odlučivost při jemných frakcích
- samotně použité splňují tyto odlučovače jen výjimečně požadavky na emisní limity, proto se většinou používají jako před-odlučovače k odloučení hrubších frakcí.

Vírové odlučovače (vírníky)

Jsou nejrozšířenějším mechanickým odlučovačem. Zásahu na tom má zejména jejich vysoká účinnost při poměrně jednoduchosti a provozní nenáročnosti. Principem jejich funkce je využití odstředivé síly, která vzniká uvedením proudu plynu do rychlého rotačního pohybu (odtud jejich běžně používaný název cyklóny).

Snaha po maximální účinnosti vede ke zvyšování rychlosti plynu v cyklonech, což se prakticky projevuje ve zmenšování jejich průměru. Takovéto jednotky nemají většinou dostatečný výkon a je nutno je slučovat do bloků, v nichž se jejich výkon sečítá. Soustava paralelně zařazených cyklónů je skupinový odlučovač (multicyklón). Výhodou cyklónů je možnost použití pro horké plyny, nevýhodou pak závislost na rychlosti průtoku plynu, opotřebení abrazí a nevhodnost pro lepivý prach [2].



Vírové odlučovače (a - s tangenciálním vstupem, b - se šroubovým vstupem, c - s axiálním vstupem)

Obr.2.2 – Schéma suchého vírového odlučovače [2]

Mokrý mechanický odlučovač

Kapalina se používá pro záchyt, resp. odvod zachycených částic. Tyto odlučovače využívají skutečnosti, že hmotnost a rozměr odlučovaných částic mají podstatný vliv na účinnost jejich zachycení. V přítomnosti kapaliny (vody) jsou smáčivé částice pohlceny vodními kapkami a jejich rozměr a hmotnost se tím mnohonásobně zvětší a odloučení takto vzniklých částic je podstatně snazší.

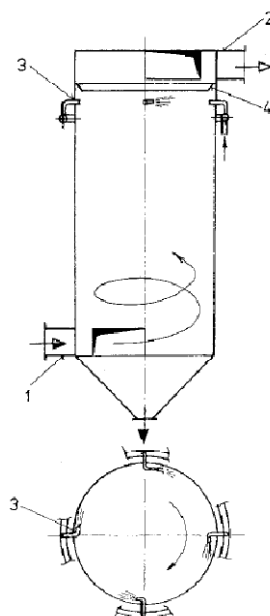
Na stejném principu jako běžné cyklóny fungují i mokré vírové odlučovače. Prach, který dosáhl povrchu stěny, je smýván vodou nastříkovanou v horní části cyklónu. Odlučovací schopnost je zvýšena smočením částic a snižuje se negativní vliv abrazivnosti a lepivosti prachu [2].

Mezi kladné charakteristické znaky mokrých odlučovačů patří tyto vlastnosti:

- v porovnání se suchými mechanickými odlučovači se dosahuje vyšších odlučivostí pro jemné částice
- jsou vhodné i pro lepivé částice
- současně s tuhými částicemi lze částečně zachycovat i plynné znečišťující látky
- mohou se používat i pro vysoké koncentrace částic
- kondenzace nenarušuje odlučovací proces, ale spíše jej v oblasti jemných částic zlepšuje
- jsou vhodné i pro odlučování výbušných prachů, neboť se minimalizuje vznik nebezpečných koncentrací

Mezi nevýhody mokrých odlučovačů patří:

- spotřeba vody na odpar, která může být limitujícím faktorem při odlučování plynů o vyšší teplotě
- potřeba vodního hospodářství
- nebezpečí koroze
- vyšší tlaková ztráta u některých typů odlučovačů
- nežádoucí ochlazení plynu před jeho vypouštěním do atmosféry
- nevhodnost použití pro cementující prachy
- vyšší náročnost na obsluhu a údržbu



Obr. 2.3 – Schéma mokrého vírového odlučovače [5]

2.2. Elektrostatické odlučovače

Principem činnosti elektrických odlučovačů (dále jen EO) je využití přitažlivých sil mezi elektricky nabitými částicemi prachu a opačně nabitou sběrací elektrodou. Nabíjení částic se dosahuje v elektrostatickém poli EO, kde jako přenašeč náboje fungují ionty ionizovaného plynu.

Podstatou každého EO je sběrací elektroda o relativně velké ploše a nabíjecí (sršící) elektroda o malé ploše, na něž je vloženo stejnosměrné napětí opačné polarity. Při zvyšování napětí začne při jeho určité (kritické) hodnotě mezi elektrodami procházet proud v důsledku ionizace molekul plynu v blízkosti nabíjecí elektrody, na níž vzniká tzv. klidný výboj neboli korona. Procházející proud je zprvu malý a roste s dále stoupajícím napětím až do stavu, kdy dojde k přeskoku a kdy koronu nelze již vytvořit.

Čím vyšší je napětí na elektrodách (55-75 kV), tím vyšší je účinnost odlučovače. Stabilita korony je podmíněna malým povrchem nabíjecí elektrody, která bývá zhotovena z drátu o malém průměru, jednak napětím, které je na ni vloženo. Záporné napětí na nabíjecí elektrodě umožňuje vznik stabilní korony při vyšším napětí.

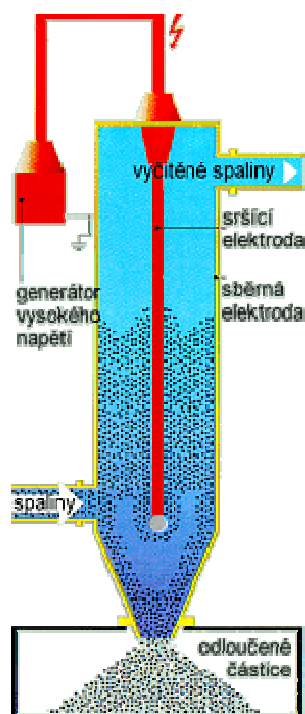
Nabíjecí elektrody jsou tenké dráty různého průřezu, napnuté ve vzdálenostech cca 15 až 20 cm. Sběrací elektrody mohou mít opět různý tvar (profil) podle konstrukce a použití odlučovače, nejčastěji jsou to různě tvarované desky nebo trubky ve vzdálenostech 30-40 cm. Odstraňování odloučeného prachu se děje nejčastěji oklepáváním elektrod pomocí kladiv, umístěných v odlučovači [1].

Mezi kladné charakteristické znaky elektrických odlučovačů patří tyto vlastnosti:

- vysoké odlučovací schopnosti i pro jemné částice (až 99.9 %)
- nízká tlaková ztráta (20 - 100 Pa)
- vhodnost pro velké objemové průtoky plynů
- možnost použití i pro vysoké teploty plynů (až 400°C)
- menší citlivost na abrazivní částice

Mezi nevýhody elektrických odlučovačů patří:

- vyšší investiční náklady
- vyšší nároky na půdorysný i obestavěný prostor
- náročnost na obsluhu i údržbu, nutnost kvalifikované obsluhy
- omezená vstupní koncentrace prachu $C_{\max} = 100 \text{ g/m}^3$
- nevhodnost pro odlučování prachu s vysokým nebo naopak s příliš nízkým měrným elektrickým odporem



Obr.2.4 – Elektrostatického odlučovače [6]

2.3. Filtry

Pro odlučování částic se nejčastěji používají vláknité vrstvy, ale také zrnité nebo porézní hmoty. Nejčastěji se používají tkaninové filtry, a ty jako odlučovací zařízení získávají v současné době stále na významu, zejména v souvislosti s vývojem nových typů tkanin s výrazně lepšími technickými vlastnostmi, jako je mechanická a zejména tepelná odolnost.

Částice se zachycují základním principem filtrace, větší částice neprojdou otvorem, zachytí se na povrchu, kde tak vzniká filtrační koláč.

Filtrace atmosférického vzduchu (např. odprašování pracovního prostředí) pracuje se znečištěním řádově mg/m^3 , filtrační tkaniny se používají jednorázově a neregenerují se.

Průmyslová filtrace čistí plyny s podstatně vyšší koncentrací tuhé fáze a množství (vrstva) prachu na filtrační tkanině se vytváří rychle. Tyto filtry se čistí (regenerují) různými způsoby, např. zpětným tokem plynu, tlakovým rázem, otřepáváním.

Filtrační tkaniny (tканé i netkané) mohou být vyrobeny z přírodních i umělých vláken. Bavlněné filtry jsou schopny pracovat při 80°C , teflonové a skleněné při 200 až téměř 300°C , pro vyšší teploty se používají filtry z vláken kovových [1].

Podle tvaru filtrační látky lze tyto filtry rozdělit na:

- hadicové
- kapsové

Hadicové

- užívá hadice z filtrační látky různé délky a průměru. Hadice jsou vyztužovány všítkými kroužky, zejména při proudění plynu zvnějšku dovnitř.

Kapsové

- vyznačuje se filtrační látkou upravenou do obdélníkových nebo plošných tvarů s drátěnou vložkou, udržující tvar kapes.

Důležitou součástí filtračního pochodu je regenerace, a to po dosažení (zvýšení) tlakové ztráty na "neúnosnou" hodnotu. Základními způsoby regenerace těchto filtrů je zpětný proplach nebo pulzní profuk. U hadicových filtrů lze regeneraci kombinovat i s mechanickými způsoby - otřásáním hadic v ose i kolmo k ní. Mechanické způsoby zvyšují stupeň regenerace, ale snižuje životnost tkaniny.

Díky technickému pokroku ve výrobě filtračních tkanin jsou tkaninové filtry v současné době použitelné prakticky ve všech případech odprašování. Jejich velkou výhodou jsou nízké pořizovací náklady a provozní spolehlivost při dodržení řádných projektových parametrů. Výhodná je i jejich vysoká účinnost, která prakticky se pohybuje nad 99 %.

Filtry nelze použít pro plyny vlhké, jejichž rosný bod je vyšší než teplota plynu během průchodu filtrem a pro odlučování lepivých příměsí.

V posledních letech se používají i filtry se zrnitými nebo slinutými vrstvami. Filtry s pískem nebo dolomitem pracují i nad 500°C.

Filtry ze slinutých porézních vrstev mívají na povrchu teflonovou membránu, uspořádání do trubek (svíčkové filtry) nebo desek. Regenerace se provádí pulzním profukem [1].

3. Popílek

3.1 Vlastnosti popílku

Popílek je jemnozrnný prach, který se skládá převážně z roztavených skelných částic kulovitého tvaru s hladkým povrchem. V závislosti na použitém uhlí se rozlišuje mezi křemičitým a vápenatým popílkem. Hlavními složkami jsou především SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 (Fe_3O_4) a ve vápenatém popílku také CaO a CaSO_4 . Složení křemičitých popílků odpovídá složení v přírodě se vyskytujících pucolánů (sopečného popela), zatímco vápenaté popílků obsahují kromě pucolánových složek také hydraulicky aktivní minerální fáze. Zvláštní vlastností křemičitého úletového popílku je jeho pucolánová aktivita, tj. schopnost reagovat za okolní teploty s vápnem a vodou za vzniku pojivých minerálních fází, které jsou podobné těm obsaženým v portlandském cementu. Vzhledem k jeho jemnosti a rozložení velikosti částic a také k jeho pucolánové aktivitě se černouhelný popílek používá většinou do stavebních materiálů spojovaných cementem k vylepšení jejich technických vlastností a k nahrazení cementu [16].

3.2 Vznik popílku

Popílek je nejjemnější frakce zbytku ze spalování uhlí o velikosti zrn do 0,3 mm. V podstatě vzniká jen pouze ze složky uhlí, které se říká popelovina. Pouze z této popeloviny vzniká onen úletový popílek, dále pak vzniká struska, která zůstává v topeništi a propadá roštem. Usazuje se v usazovacích a jiných zachytých zařízeních, především v komorách, cyklonech a na mechanických a elektrických filtrech. Popílek je heterogenní materiál složený z částic o rozdílných fyzikálních, mineralogických a chemických vlastnostech. Při vlastním spalování jsou všechny mineralogické složky vystaveny různě dlouhou dobu vysokým teplotám a navíc ještě mohou procházet oxidačním nebo redukčním prostředím, z toho vyplývá různé mineralogické složení popílků. Popílků vždy obsahují mimo nerostné zbytky ještě zbytky původního nebo do různého stupně přeměněného paliva. Vlastnosti popílků tedy záleží zejména na chemickém složení spalovaného uhlí (z různých lokalit) a chemických reakcích během spalování a také na konstrukci topeniště a zařízení postupu spalování. Po chemické stránce je popílek složen hlavně z oxidu křemičitého a hlinitého, podstatně méně je zastoupen oxid železitý, vápenatý, hořečnatý, alkálie a sírany. Vyšší obsah síranů je v hnědouhelných popílcích. Fluidní popílků jsou charakteristické vyšším obsahem Ca , který je přidáván do spalovacího procesu nejčastěji ve formě vápence kvůli odsíření. Některé druhy popílků jsou radioaktivní nebo obsahují radon, který se postupně uvolňuje a dostává se do ovzduší. V tab. 3.1 je ukázáno chemické složení popílku z

klasického spalování uhlí. V citované literatuře však není uvedeno, jakým způsobem byly výsledky získány [17].

Popílek	Zastoupení složek [hmotnostní %]								
Klasické	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
spalování	52,22	28,01	3,09	1,38	2,37	9,66	0,6	0,51	1,59

Tab. 3.1 Hmotnostní složení popílku [17]

4. Základní zákony proudění plynů

4.1 Zákon zachování hmotnosti

Je základní rovnice pro řešení problémů spojených s prouděním kapalin a je založena na bilanci proudící látky. Hmotnostní tok stěnou označovanou s o objemu V , který je roven rychlosti změny hmotnosti kapaliny v daném objemu. Pro kontrolní objem, ve kterém proudí kapalina, musí být hmotnost tekutiny konstantní. Z tohoto plyne, že její celková změna je nulová [4].

V kontrolním objemu mohou vzniknout dva případy změny hmotnosti:

- **lokální neboli časová změna** – v kontrolním objemu se kapalina rozpíná nebo stlačuje
- **konvektivní změna** – je způsobena rozdílem přitékající a odtékající hmotnosti z kontrolního objemu.

Součet obou těchto změn průtoku se musí rovnat nule. Případně zdrojovému členu S_z . Toto je možné pouze tehdy, pokud jsou obě změny stejně velké, ale mají jiná znaménka. To znamená, že jedna způsobí zvýšení a naopak ta druhá snížení hmotnosti. Aplikací zákona zachování hmotnosti na zvolený kontrolní model kapaliny, například elementární hranol o objemu $dV=dx \cdot dy \cdot dz$ (viz. Obr. 4.1), dostaneme rovnici kontinuity v diferenciálním tvaru [4]

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

Tato rovnice se nazývá obecná rovnice kontinuity pro neustálené prostorové proudění stlačitelné kapaliny.

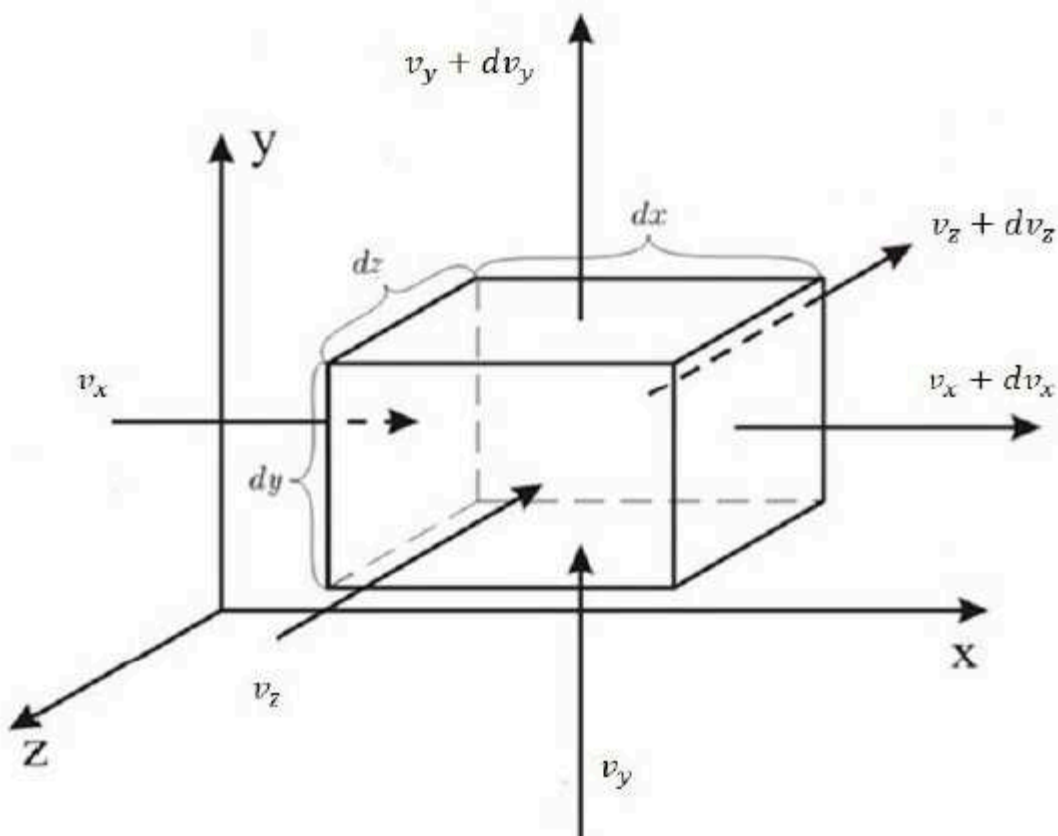
Při ustáleném proudění se veličiny nemění v čase, proto platí $\frac{\partial(\rho)}{\partial t} = 0$

Rovnice kontinuity se změní na tvar:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = S_Z \quad (4.2)$$

Při ustáleném proudění nestlačitelné kapaliny, u níž je hustota ρ konstantní, je rovnice vyjádřena vztahem:

$$\frac{\partial(v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = S_Z \quad (4.3)$$



Obr.4.1–Elementární hranol [4]

4.2. Zákon zachování energie

Zákon zachování energie je vlastně vyjádření prvního zákona termodynamiky. Je-li princip použit na zvolený model látky, např. na nekonečně malý element látky pohybující se s okolní tekutinou, pak první zákon termodynamiky říká, že rychlost změny energie v elementu je rovna toku tepla do elementu plus intenzita práce objemových a plošných sil působících na element [4]. Obecný složkový zápis rovnice energie pak bude:

$$\rho v_i \cdot \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \rho \cdot G_i v_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\tau_{ij} v_i) \quad (4.4)$$

Uvedené pohybové rovnice vyjadřující jednotlivé zákony zachování lze použít pro laminární i turbulentní proudění. Pro laminární proudění tvoří uzavřenou soustavu rovnic. Řešení turbulentního proudění je mnohem náročnější. Jednotlivé veličiny (složky rychlosti v_i , tlak p , teplota T a hustota ρ) představují okamžité hodnoty náhodných nestacionárních veličin a všechna řešení turbulentního proudění jsou tudíž pouze jakousi aproximací.

4.3. Zákon zachování hybnosti

Rovnováha sil při proudění skutečné tekutiny je vyjádřena Navier-Stokesovými rovnicemi. Tyto rovnice vyjadřují vztah, kde setrvačná síla je rovna součtu hmotnostní, tlakové a smykové síly [4].

Aplikací druhého Newtonova zákona

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (4.5)$$

na vybraný model viskózní tekutiny dostaneme rovnici hybnosti. Nejvhodnější cestou k získání této rovnice je aplikace zákona na elementární kontrolní objem dV . Obdobně jako při odvození rovnice kontinuity. Rovnováha sil při proudění viskózní tekutiny je vyjádřena vektorovým součtem sil [4].

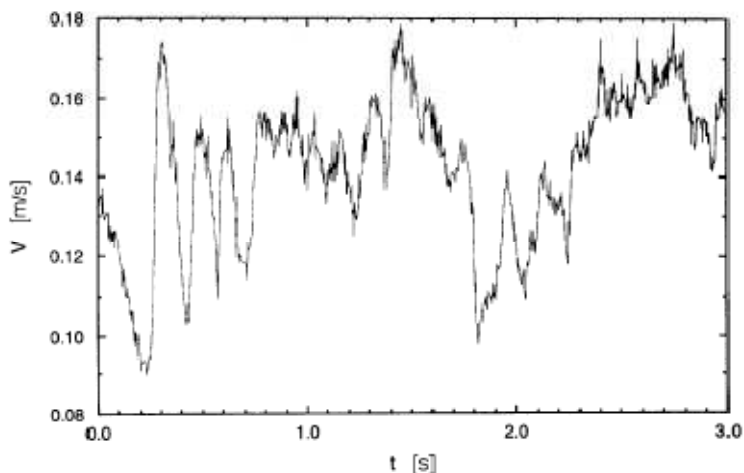
$$\vec{F}_S = \vec{F}_m + \vec{F}_p + \vec{F}_t \quad (4.6)$$

Vnější hmotnostní síla F_m působící na tekutinu se vyjádří na jednotku hmotnosti tekutiny složkami zrychlení a_x, a_y, a_z (složky derivací rychlosti v daných směrech). Tlaková síla F_p je dána složkami normálového napětí $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ a smyková síla F_t je dána smykovými napětími τ_x, τ_y, τ_z . Setrvačná síla F_s je určena setrvačným zrychlením a hmotností elementárního hranolku tekutiny. Obecný složkový zápis rovnice hybnosti neboli **Navierova-Stokesova rovnice**, pak bude [7]:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j = G_i - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t_i} + \frac{\lambda + \mu}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\mu}{\rho} \Delta v_i. \quad (4.7)$$

5. Turbulentní proudění

Proudění se obecně nazývá turbulentní, jestliže jeho proměnné vykazují chaotické fluktuace jak v prostoru, tak v čase, viz obr. 5.1.



Obr. 5.1- Plně vyvinuté turbulentní proudění – rychlost jako funkce času [4]

Rovnice popisující proudění jsou známy již desítky let. Bohužel problém turbulence z hlediska fyziky není stále vyřešen. Ačkoliv byl v současné době udělán významný pokrok, zvláště v oblasti nelineárních dynamických systémů nebo teorie chaosu, úplné řešení turbulence nelze v blízké budoucnosti očekávat. Avšak zájem o turbulenci není inspirován pouze přáním. Turbulentní proudění skutečných kapalin porozumět její podstatě, ale nutností předpovídat turbulentní proudění v mnoha technických aplikacích. Navzdory náhodnosti turbulence detailní studie ukazují, že turbulentní proudění sestává z prostorových struktur, které se obvykle nazývají „eddies“, (turbulentní víry) [4].

Je snahou charakterizovat turbulenci pomocí těchto struktur, aby bylo možno vysvětlit dynamiku turbulence při vzniku, vývoji a zániku vírů „eddies“ jako funkci času. Je zřejmé, že tento výzkum závisí na možnostech získat informace o prostorových strukturách turbulence a jejich vývoji v čase. Rychlý rozvoj výpočetní techniky v posledních letech umožňuje řešit tyto rovnice přístupem, který se nazývá numerická simulace, což je jeden z nástrojů studia základních aspektů turbulence. Její hlavní výhodou je, že dává detailní informace o trojdimenzionálních strukturách, které nelze získat měřením v laboratoři [7].

5.1. Teorie turbulence

Jak bylo zmíněno, turbulentní proudění zahrnuje prostorové struktury, nazývané „eddies“, tj. turbulentní víry rozdílných velikostí. Velké víry, které obsahují energii, se rozpadají na menší víry. Tento kaskádovitý proces je zakončen disipací energie nejmenších vírů na teplo [4].

Turbulentní víry jsou charakterizovány délkovým měřítkem l (tj. geometrií oblasti resp. charakteristickým rozměrem) a rychlostním měřítkem u . V následujících kapitolách budou tato měřítka označována jako makroměřítka.

Na druhé straně tekutina, ve které se objevuje turbulence, je charakterizována svými molekulárními vlastnostmi, jako je kinematická viskozita ν . Hlavním důsledkem kinematické viskozity je vyhlazení rychlostních gradientů pomocí molekulární difúze [7].

Tyto zavedené parametry dovoluují zavést bezrozměrnou veličinu, kterou nazýváme Reynoldsovým číslem:

$$Re_l = \frac{u \cdot l}{\nu}, \quad (5.1)$$

které lze upravit následovně:

$$Re_l = \frac{u \cdot l}{\nu} \frac{l}{l} = \frac{\frac{l^2}{\nu}}{\frac{l}{u}} = \frac{T_v}{T_t}, \quad (5.2)$$

kde T_v označuje časové měřítko přenosu turbulentních vírů o makroměřítku l a T_t označuje časové měřítko molekulární difúze. Proudění lze popsat na základě hodnoty

Reynoldsova čísla následovně [3], jestliže:

- $T_v < T_t \rightarrow Re < 1$ **laminární proudění**, procesy molekulární difúze převažují a turbulentní víry zanikají.
- $T_v > T_t \rightarrow Re > 1$ **turbulentní proudění**, turbulentní víry přetrvávají. Nerovnost je splněna pro poměrně malé hodnoty parametrů proudění, takže lze udělat závěr, že většina proudění je turbulentní.
- $T_v \gg T_t \rightarrow Re \gg 1$ **plně vyvinutá turbulence**, což znamená, že viskózní děje, které ovlivňují časové měřítko T_v mohou být zanedbány vzhledem k dynamice vírů, které se objevují nad hodnotou T_t . Turbulentní víry v plně vyvinutém turbulentním proudění jsou téměř neviskózní.

- $T_v \approx T_t \rightarrow Re \approx 1$ **přechodový stav**, laminární stacionární proudění se mění na turbulentní, nestacionární, pokud je překročeno kritické Reynoldsovo číslo Re_{krit} . Proudění se zpočátku stává periodické. Tato kvalitativní změna v chování proudění se nazývá bifurkace. Při zvyšování Reynoldsova čísla se vytvářejí další nestability, až se proudění stane plně turbulentní [4].

5.2. Boussinesquova hypotéza

Základem matematických modelů turbulence, hlavně těch jednodušších, je popis lokálního stavu turbulence pomocí rychlostního a délkového měřítka. Úkolem jednotlivých modelů turbulence je pak vyjádřit turbulentní napětí a toky tepla nebo jiných skalárních veličin pomocí zvoleného měřítka a určit rozložení tohoto parametru v proudovém poli. Většina modelů právě využívá Boussinesquovy hypotézy o vírové (turbulentní) viskozitě. Tato hypotéza předpokládá, že podobně jako při laminárním proudění, kdy platí ve zjednodušeném dvourozměrném proudění pro smykové napětí Newtonův vztah $\tau = \eta \frac{dv}{dy}$ jsou turbulentní napětí a turbulentní toky úměrné gradientu střední rychlosti apod., tj.

$$\tau_t = \overline{\rho v'_i v'_j} = \eta_t \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j}. \quad (5.3)$$

Obecně pak

$$-\overline{\rho v'_i v'_j} = \eta_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (5.4)$$

resp.

$$-\overline{v'_i v'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (5.5)$$

kde

$$k = \frac{1}{2} \overline{v'_i v'_i} \quad (5.6)$$

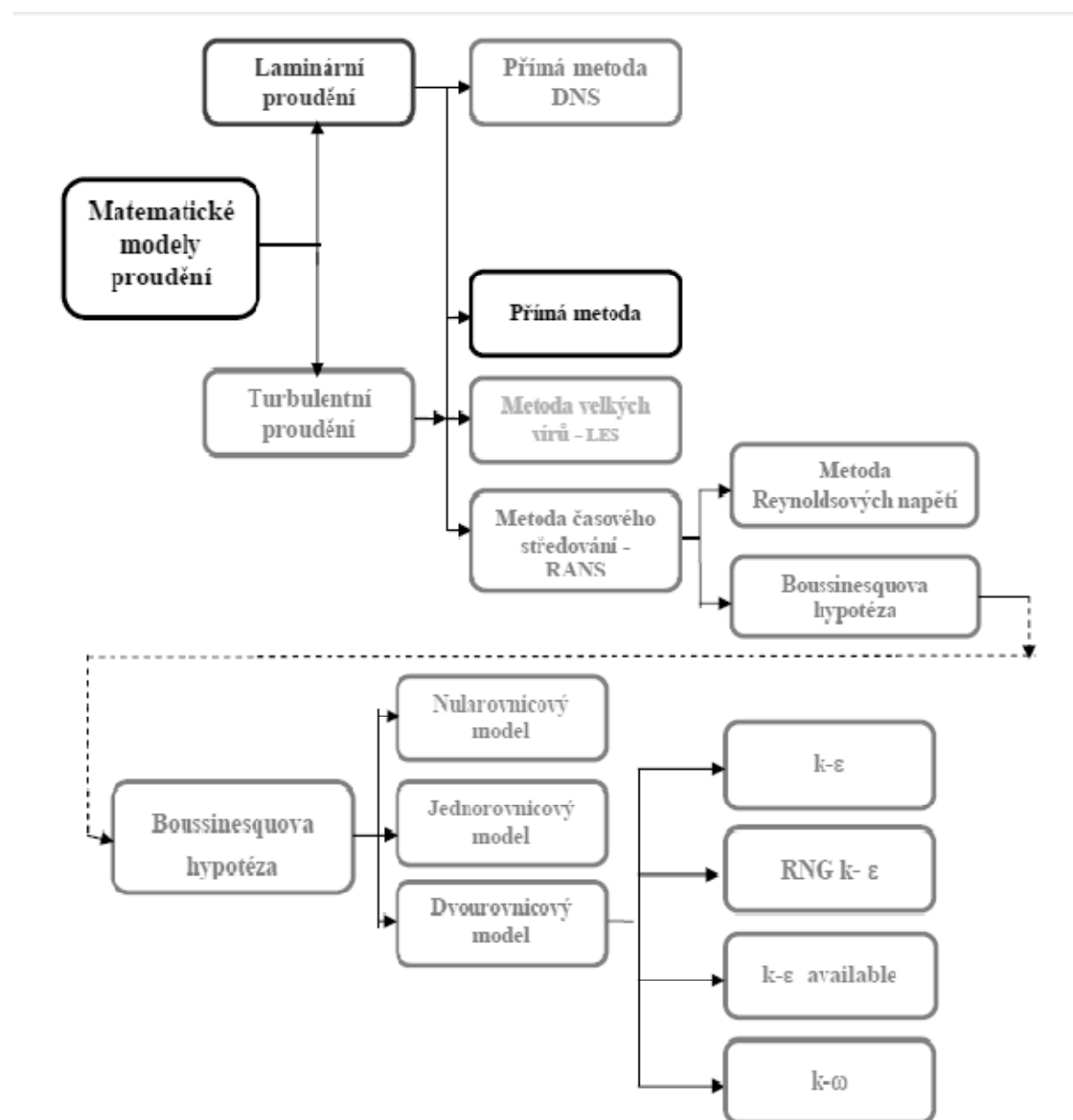
je turbulentní kinetická energie a ν_t je turbulentní viskozita. Na rozdíl od laminárního proudění tato veličina není fyzikální vlastností kapaliny, ale proudění. Je silně závislá na míře turbulence a může se výrazně lišit v rámci proudového pole.

Boussinesquova teorie vírové viskozity říká, že turbulentní napětí v určitém místě můžeme popsat lokálními hodnotami gradientů (či též deformačního tenzoru). Toto však platí dobře pro molekulární napětí, avšak turbulence není lokální, jelikož $l \approx L$. Zjednodušeně řečeno, Boussinesquově teorii vírové viskozity chybí fyzikální základ.

Její použití je nutno chápat jako silně empirické, ale přesto v mnoha případech dává velmi dobré přiblížení k realitě [8].

5.3. Statistické modely turbulence

Soubor empirických vztahů a přídavných rovnic, které společně s pohybovými rovnicemi tvoří řešitelný systém rovnic, nazýváme modelem turbulence. Modely turbulence lze rozdělit do několika skupin dle obr. 5.2



Obr. 5.2– Schéma metod řešících proudění [4]

5.4. Statistické modely turbulence

Model k- ε standard

Dvourovnicový $k - \varepsilon$ model stanovuje turbulentní viskozitu prostřednictvím dvou transportních rovnic pro k a ε . Tento model využívá Boussinesqovy hypotézy o vírové viskozitě a vztahuje turbulentní viskozita μ_t ke k , ε a C_μ .

$$\mu_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.7)$$

kde C_μ je empirická konstanta.

Rozložení k je dáno transportní rovnicí. Exaktní tvar transportní rovnice pro ε je možné vyvodit opět z Navierových - Stokesových rovnic, tato rovnice obsahuje komplexní závislosti, které je opět nutné aproximovat[2]. Využívá se pro vysoké hodnoty Reynoldsových čísel, řádově pohybujících se v hodnotách $Re = 10^5$ a více.

Model k- ε RNG

Model se získá statistickým postupem nazvaným renormalizační grupová teorie (zkratkou RNG). Je přesnější i spolehlivější pro většinu proudů, než standardní k-3 model. Turbulentní vazkost je vyjádřena stejnou rovnicí (5.5). Renormalizační procedura aplikovaná na turbulenci spočívá v postupné eliminaci malých vírů. Přitom se přetransformují pohybové rovnice (Navierovy - Stokesovy rovnice) tak, že se modifikuje turbulentní viskozita, síly a nelineární členy. Metoda RNG je přibližně o jednu desetinu pomalejší než standardní dvourovnicový model. V oblastech zavíření (kde se kapalina zpomalí a je tam nižší Re číslo) je přesnější [2].

Model k- ω

Dvourovnicový model k -omega řeší stejně jako model k-epsilon dvě dodatkové diferenciální rovnice. Rychlostní měřítko turbulence je řešeno prostřednictvím turbulentní kinetické energie k , stejně jako u předchozího modelu. Délkové měřítko turbulence je však řešeno prostřednictvím nové veličiny zvané vířivost ω . Vířivost je míra rotace kapaliny v daném bodě proudového pole. Je definovaná vztahem:

$$\omega = \frac{k}{\varepsilon} \quad (5.8)$$

Standardní k- ω model

Tento turbulentní model je vhodný pro proudění s nízkými Reynoldsovými čísly a úlohy s přechodovým režimem proudění, kde není plně vyvinutá turbulence. Nevýhoda tohoto modelu je velká citlivost na podmínky ve volném proudu (proudění ve velké vzdálenosti od stěny).

Turbulentní vazkost je určena vztahem:

$$\mu_t = a^* \cdot \frac{k}{\omega} \quad (5.9)$$

kde a^* je empirická konstanta.

Model k- ω SST

Modifikovaná definice turbulentní vazkosti, která bere v úvahu transport turbulentního smykového napětí.

Tento model se nazývá k- ω SST (*shear stress transport*), turbulentní vazkost je definovaná vztahem:

$$\mu_t = \frac{k}{\omega} \cdot \frac{1}{\max\left[\frac{1}{a^*}, \frac{S \cdot F_2}{a_1 \cdot \omega}\right]} \quad (5.10)$$

6. Vícefázové modely

6.1 Vícefázové modely obecně

Velké množství aplikací v přírodě a v průmyslových technologiích se týká směsí fází.

Fázemi se předpokládá:

- plyn
- kapalina
- pevná látka

V multifázovém proudění je fáze definována jako identifikovatelná třída materiálu, který má částečnou inertní odezvu na interakci s prouděním a potenciálem pole, ve kterém se vyskytuje. Např. pevné částice různých velikostí téhož materiálu mohou být považovány za různé fáze, protože každé seskupení částic o téže velikosti má podobné dynamické vlastnosti v proudovém poli [4].

Varianty vícefázových systémů:

- a) *plyn – kapalina nebo kapalina – kapalina*
 - proudění bublin plynu nebo velkých kapek kapaliny ve spojitém prostředí
 - proudění kapek ve spojitě fázi plynu
 - pomalé proudění velkých bublin
 - proudění s volnou hladinou, s jasně definovanou hladinou
- b) *plyn – pevná látka*
 - proudění pevných částic v plynu
 - pneumatická doprava
 - fluidizační pole
- c) *kapalina – pevná částice*
 - proudění kalu
 - sedimentace
- d) *třífázové proudění*
 - kombinace výše uvedených variant

6.2. Přístupy k modelování vícefázového proudění

V současné době existují dva přístupy pro modelování vícefázového proudění.

- Euler - Lagrangeův přístup
- Euler - Eulerův přístup

6.2.1. Euler – Lagrangeův přístup

Při Euler - Lagrangeově přístupu je tekutá fáze uvažována jako kontinuum a je řešena Navierovými - Stokesovými rovnicemi, kdežto dispergovaná fáze (částice) je řešena pomocí stopování velkého počtu částic, bublin nebo kapek v proudovém poli. Tato dispergovaná fáze může zaměňovat moment, hmotu a energii se spojitou fází. Prvotním předpokladem je, že v tomto modelu dispergovaná fáze obsahuje malý objemový zlomek, avšak pro hmotnost, resp. hmotnostní průtok to nemusí platit ($Q_{m,částic} \geq Q_{m,tekutiny}$). Trajektorie (dráhy) částic nebo kapek jsou počítány individuálně v předdefinovaných intervalech v průběhu doby výpočtu spojitě fáze. Toto umožňuje modelovat proudění částic ve sprejích, sušičkách, spalování uhelných a kapalných paliv a částicemi ovlivněné proudění. Je nevhodný pro modelování směsi kapalina - kapalina, fluidizačního lože a dalších aplikací, kde objemový zlomek druhé fáze není zanedbatelný [4].

6.2.2. Euler – Eulerův přístup

Při Euler-Eulerově přístupu jsou různé fáze řešeny matematicky jako navzájem se prostupující kontinua. Jelikož objem jedné fáze není překryt objemem druhé fáze, je zaveden pojem objemového zlomku fáze. Tyto objemové zlomky se předpokládají jako funkce spojité v čase a prostoru a jejich součet je roven 1. Rovnice jsou definovány pro každou fázi.

6.3. Vícefázové matematické modely

Vícefázové modely [9] umožňují modelování většího počtu oddělených, ale vzájemně seovlivňujících fází. Fáze mohou být kapalná, plynná a pevná v různých kombinacích (plyn-tekutina, tekutina-tekutina, plyn-pevná látka, kapalina-pevné částice, trojfázové proudění (kombinace předchozích). V literatuře se objevují a řeší tři multifázové modely, a to:

- VOF model
- model směsi
- Eulerův model

VOF MODEL

Je vhodný pro stratifikované (vrstvené) proudění a proudění s volnou hladinou. Tímto modelem se může řešit proudění dvou a více nesmíselných kapalin řešením pohybové rovnice a sledováním objemového zlomku každé kapaliny v oblasti. Typické aplikace zahrnují předpověď odtržení proudu, pohyb velkých bublin v kapalině, pohyb kapaliny za hrází a ustálené nebo neustálené sledování jakýchkoliv rozhraní kapalina–plyn [4].

MODEL SMĚSI (MIXTURE MODEL)

Je zjednodušený vícefázový model, který lze použít k modelování vícefázového toku, kde se jednotlivé fáze posouvají různou rychlostí. Toho se může využít také k modelování homogenního vícefázového proudění s velmi silnou vazbou a fázemi pohybujícími se stejnou rychlostí. Předpokládá se ale lokální rovnováha na krátkém prostorovém délkovém měřítku. Vazba mezi fázemi musí být pevná. Model směsi můžeme modelovat n-fází (tekutina nebo částice) řešením pohybové rovnice, rovnice kontinuity a rovnice energie pro směs, rovnice objemového zlomku pro druhou fázi (dispergovanou) a algebraického výrazu pro relativní rychlosti [4]. Typická aplikace zahrnuje sedimentace, cyklónové separátory, částice s nízkým zatížením a bublinkovité proudění, kde je objemový zlomek plynu velice nízký.

EULERŮV MODEL

Dovoluje modelování vícenásobných oddělených interaktivních fází. Fáze mohou být tekutina, plyn a pevné látky v nějaké kombinaci. U Eulerova multifázového modelu je počet dalších fází limitován pouze požadavky na paměť a konvergenci řešení. To znamená, že lze modelovat libovolný počet dalších fází, pokud je k dispozici dostatečná paměť počítače.

6.3.1 Trajektorie pohybu pevných částic v plynu

Modelování trajektorie pevných částic je jedním typem vícefázového proudění. Dané pevné částice jsou téměř výhradně unášeny turbulentními proudy v tzv. Lagrangeově pojetí. Tato druhá fáze obsahuje kulové částice (také kapky nebo bubliny). Částice nejsou modelovány jednotlivě, ale jsou nahrazeny předdefinovanými vzorky, které charakterizují proudění.

Vlastní průtok částic je matematicky namodelovaný tak, že sledujeme menší počet těchto částic, který se pohybuje ve spojitě fázi. Částice se pohybuje z bodu, plochy, oblasti ohraničené souřadnicemi, kuželové plochy, ze kterých je vypuštěna, dokud neopustí danou oblast. Pohyb těchto částic je ovlivněn gravitací a hydrodynamickým dějem. Přestup tepla, hmoty a pohyb částic jsou mezi sebou definované pomocí soustav diferenciálních rovnic závislých na času, dále z rovnic pro pohyb, teplotu, rychlost a hmotnost částic. Integrovaní těchto rovnic prováděno jednoduchými integračními metodami, a to proto, aby se propočítalo chování částic skrze celou oblast. Spojitá fáze se může s částicemi navzájem ovlivňovat [4].

Rovnice pohybu částic

Rovnováha sil při použití Lagrangeova přístupu je dána vztahem

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x}{\rho_p}(\rho_p - \rho) + F_x. \quad (6.1)$$

$F_D(u - u_p)$ je síla hydrodynamického odporu vztažná na jednotku hmotnosti částice.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p \cdot D_p^2} \cdot \frac{C_D \cdot Re}{24} \quad (6.2)$$

Reynoldsovo číslo je pak dáno vztahem:

$$Re = \frac{\rho \cdot D_p \cdot |u_p - u|}{\mu} \quad (6.3)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (6.4)$$

6.3.2 Definování zdroje diskretní fáze

Pro definování zdroje částic je použita počáteční pozice zdroje částic, velikost částic, jejich teplota a rychlost. Materiálu částic je nutno nadefinovat fyzikální vlastnosti materiálu a uvážit možný vliv eroze a dalších jevů.

U počátečních podmínek se uvádí rozložení částic podle velikosti. Můžeme uvažovat možnost částic o konstantním průměru nebo lineární změně průměru částic. Velmi často se využívá Rosin-Rammlerova rozdělení, kdy nemají prachové částice stejný průměr a jejich velikosti lze statisticky rozdělit do určených tříd [4].

Rosin-Rammlerova exponenciální závislost

$$Y_D = \exp \cdot \left(- \left(\frac{D}{\bar{D}} \right)^n \right) \quad (6.5)$$

Průměr D (μm)	Hmotnostní zlomek Y _D (-)
0-70	0.05
70-100	0.1
100-120	0.35
120-150	0.3
150-180	0.15
180-200	0.05

Tab. 6.1 - Příklad rozdělení částic podle velikostí do tříd

Specifikace zdroje částic

K definování hodnot se používá funkce *Injection*s, kde se volí možnosti vstupu pevných částic, jejich velikost, druh materiálu částic, možnosti zdroje.

Varianty možných zdrojů:

- single – pro každou částici je nutné definovat počáteční podmínky
- group – počáteční podmínky jsou definovány pro skupinu částic
- kužel
- plocha
- a i různé kombinace nebo speciální zdroje

Pro **single zdroj** je nutno definovat souřadnice zdroje, souřadnice rychlosti, průměr částic, hmotnostní průtok.

Pro **group zdroj** se definuje souřadnice prvního a posledního paprsku, ostatní budou mít souřadnice rozložené lineárně mezi těmito krajními. Ostatní zadání je podobné předchozí úloze [4].

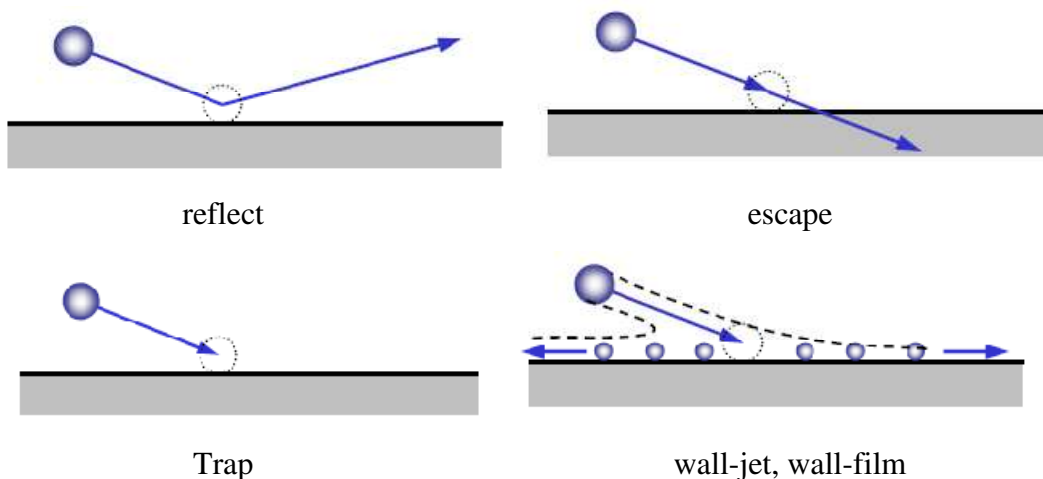
Pro **zdroj plocha** se určuje plocha pro vstup částic, souřadnice rychlosti, hmotnostní průtok, průměr částic.

Okrajové podmínky pro diskrétní fázi

Slouží k určení reakcí, kdy částice narazí nebo se připlíží k dané výpočetní oblasti.

Z nastavení pak lze zvolit tyto typy podmínek:

- reflect – částice se při kontaktu se stěnou pružně odrazí
- escape – částice při kontaktu opouští výpočetní oblast
- trap – částice se přichytí na povrchu stěny a dále se již nepohybují
- wall-film – tato podmínka se skládá ze čtyř režimů (stick, rebound, spread and splash), které jsou založeny na nárazové energii a teplotě stěny
- wall-jet – podmínka vhodná pro vysoké teploty stěn, na kterých se netvoří přílišný kapalinový film



Obr. 6.1 – znázornění okrajových podmínek DPM [20]

Fyzikální modely diskrétní fáze

Je možno volit nastavení z těchto fyzikálních pohybových rovnic, řešících daný pohyb částic:

- *Thermophoreticforce* – použití při trajektoriích částic, kde působí thermophoretické síly, je nutné nastavit thermophoretický koeficient pro daný materiál částic
- *Saffman lift force* – silové účinky na částice
- *VirtualMassForce, Pressure Gradient Force* – používají se, když je hustota kapaliny o mnohem nižší, nežli hustota částic (zpravidla v poměru 1:10)
- *Erosion/Acceration* – eroze a zachycení částic na stěně, je zde důležité vhodně nastavit stěnovou funkci a úhel dopadu částic
- *Two - Way Turbulence Coupling* – zahrnuje možnost vlivu samotných pevných částic na vznik nebo zánik turbulentního proudění
- *Breakup* – vhodné pro modelování trysek nebo vstřikování, kdy se jedná o sledování a chování kapek kapaliny
- *Stochastic Colision* – kolize závislá na mikroskopické struktuře povrchu částic, definovaná jako koule, na které se vyskytuje velké množství nerovností
- *DEM Colision* – používá se pro výpočet pohybu a vlivu velkého počtu malých částí

Oblasti aplikací diskrétní fáze

Proudění pevných částic v:

- cyklonech
- sušičkách
- pneumatických dopravnících
- uhelných pecích

Trajektorie kapek:

- spreje
- spalovny
- hasící trysky

Trajektorie bublinek plynu v kapalině

- provzdušňovače
- odlučování bublinek plynu z kapalin

7. Simulace proudění vzduchu v odlučovači

K matematickému modelování byl využit software ANSYS Fluent. Za pomoci tohoto softwaru bylo proudění simulováno a řešeno jako 3D a dále bylo řešeno vícefázové proudění a to za pomoci definování diskrétní fáze. V tomto byly nastaveny částice, které byly vpuštěny do výpočtového modelu.

7.1 Stanovení okrajových podmínek

Okrajová podmínka stěny (*Wall*)

Tato základní okrajová podmínka určuje oblast nepropustného povrchu. Jak z názvu vyplývá, tak se jedná o definování pevné stěny, která vymezuje proudění mezi vstupem a výstupem tekutiny či plynu. Je třeba u ní počítat s možností výskytu mezní vrstvy [7].

Tlak na výstupu (*Pressure outlet*)

Touto okrajovou podmínkou se zadává hodnota statického tlaku. Je odolná vůči zpětnému proudění, přičemž si zachovává dobrou konvergenci řešení. V tomto případě je ale nutné určit ostatní okrajové podmínky jako teplotu, nebo turbulentní veličiny [7].

Tlak na vstupu (*Pressure inlet*)

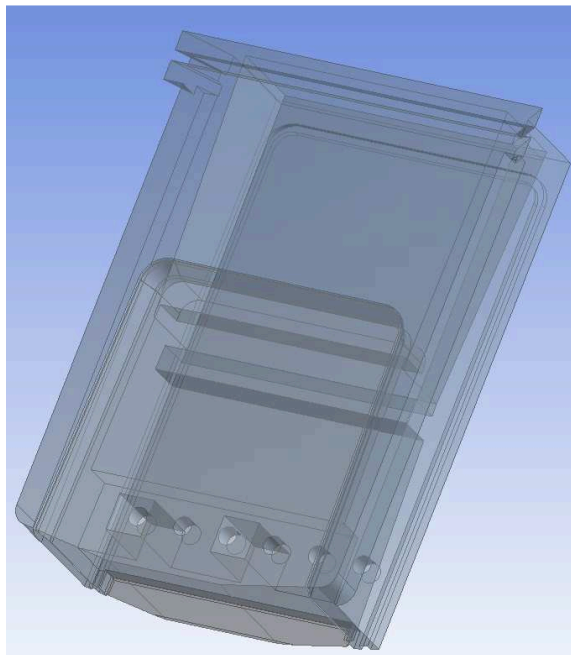
Tato okrajová podmínka se používá k definování tlaků na vstupech. Jsou vhodné k výpočtům jak pro nestlačitelné, tak pro stlačitelné proudění. Tato podmínka se využívá, pokud není známá počáteční rychlost nebo průtok. Podmínka může být použita k definování mezních hodnot průtoku.

Název	Typ podmínky	Zadané hodnoty
stěna	WALL	-
terciální přísávání vzduchu	PRESSURE INLET	$p = 0 \text{ Pa}$, $T = 300 \text{ K}$
vstup částic	PRESSURE INLET	$p = 0 \text{ Pa}$, $T = 700 \text{ K}$
výstup částic	PRESSURE OUTLET	$p = -15 \text{ Pa}$, $T = 700 \text{ K}$

Tab. 7.1 – Tabulkový zápis okrajových podmínek

7.2 Zadaná geometrie

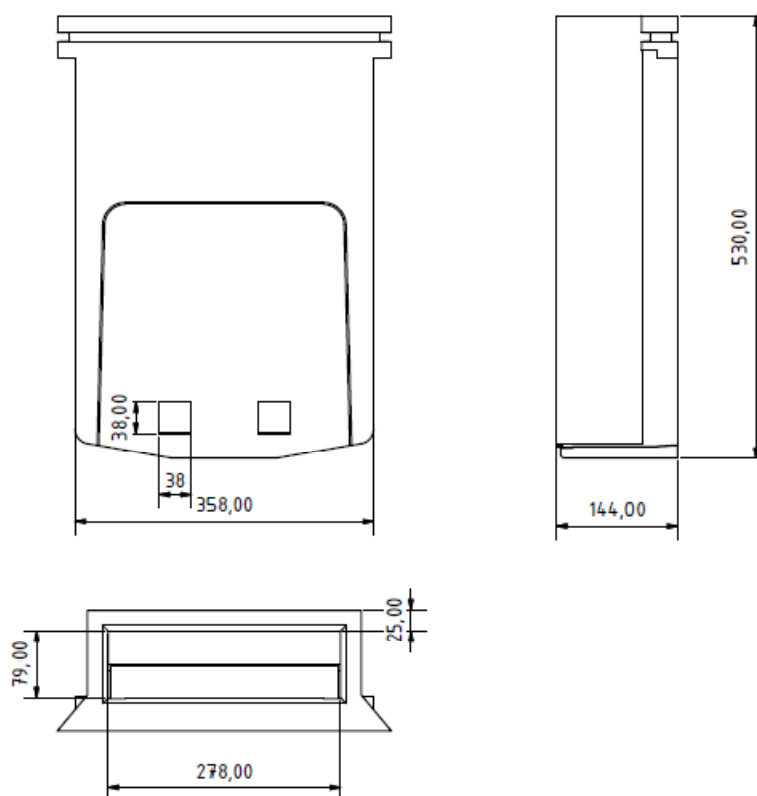
Dle zadání práce je zapotřebí vytvořit matematický model zadané geometrie a za pomoci matematické simulace v softwaru Ansys Fluent provést výpočtovou simulaci.



Obr. 7.1 – Zadaná geometrie

Základní rozměry odlučovače

Základní geometrie byla k diplomové práci dodána od zadavatele.

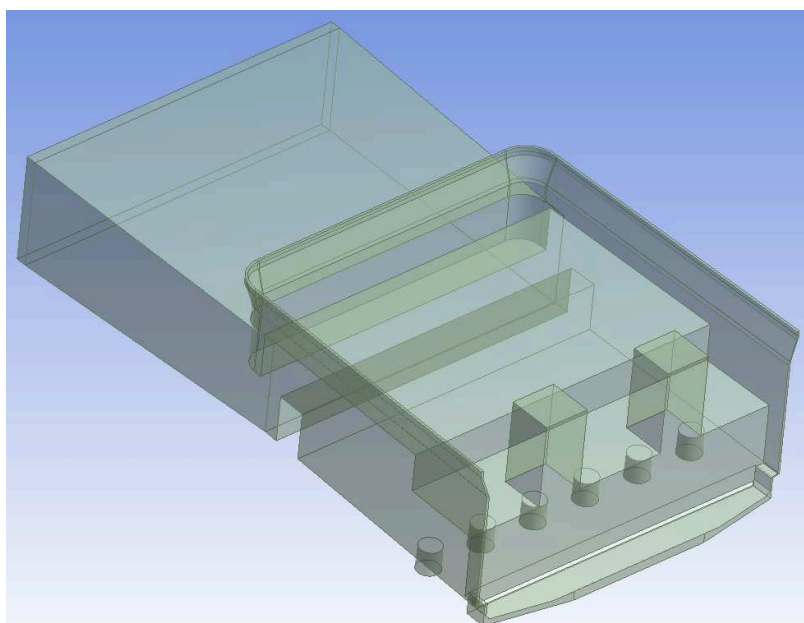


Obr. 7.2 – Základní rozměry zadané geometrie

7.3 Příprava modelu

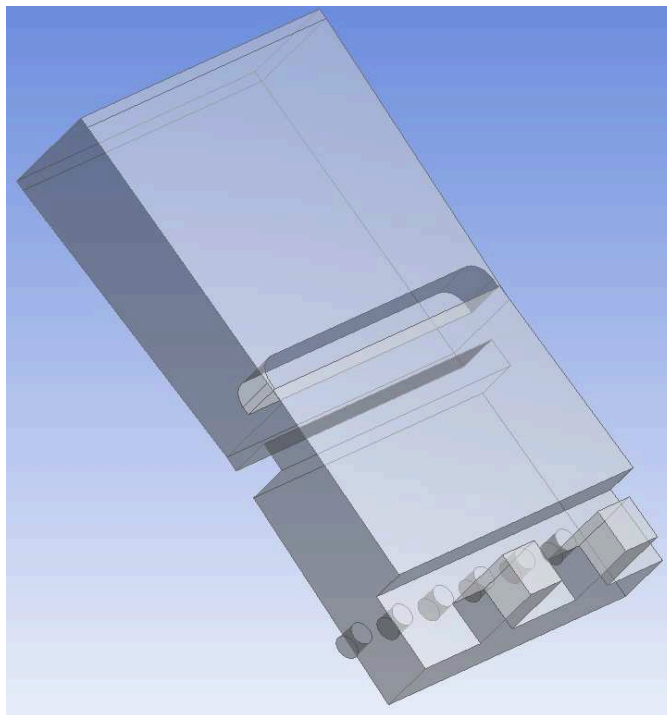
Zadaná geometrie byla načtena programem Design Modeler a následně ji bylo zapotřebí upravit. Pro matematickou modelaci potřebuji jen vnitřní objem (*Fluid*), ve kterém je simulováno proudění s příměsí částic.

Tento vnitřní objem jsem vytvořil pomocí funkce *Boolean*. Zde jsem nastavil záložku *Operation*, zde jsem zvolil typ *Subtract*. Dále se nastaví *Target Bodies* a *Tool Bodies* a v záložce *Preserve Tool Bodies* zvolíme možnost *No*. Vygenerovaly se tři výsledné části. K získání potřebného vnitřního objemu jsem se potřeboval zbavit dvou vzniklých volných objemů. Toto jsem provedl pomocí funkce *Body Operation*, kde jsem vybral příkaz *Delete* a zvolil dvě nepotřebné části.



Obr. 7.3 – Vnitřní objem se vzduchovými mezerami

Ted' tedy vznikl požadovaný vnitřní objem. Ten však bylo ještě nutno upravit, protože zde zůstaly i vzduchové mezery mezi jednotlivými částmi zadané geometrie. Provedl jsem tedy import vnitřního objemu do programu Autodesk Inventor a provedl nezbytné úpravy tak, aby byly odstraněny všechny vzduchové mezery, které vznikly při předchozí operaci.



Obr. 7.4 – Výsledný vnitřní objem (*Fluid*)

7.4 Vytvoření výpočetní sítě

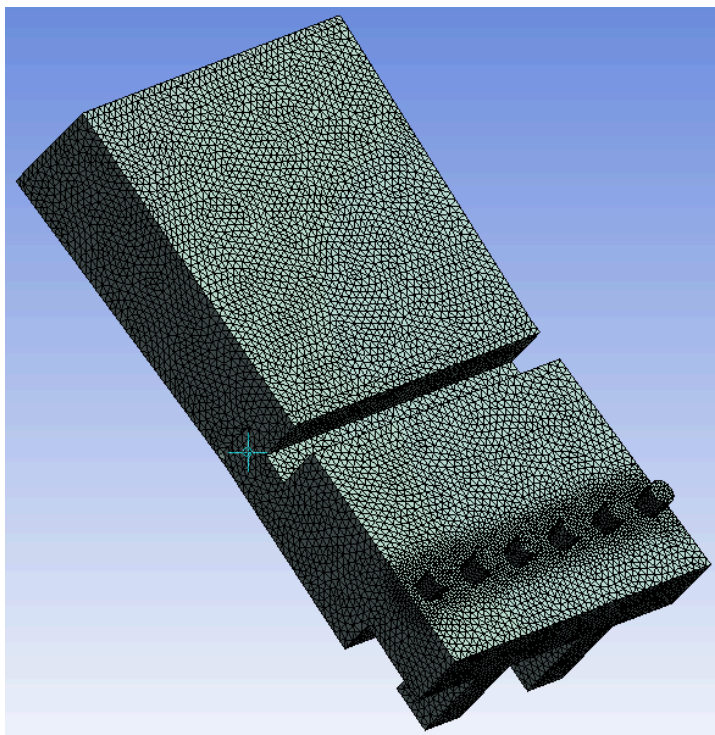
Síť byla vytvořena programem Ansys Meshing. Zde jsem nastavil tzv. *Named Selections*, kterými jsem definoval vstup, výstup, stěnu a terciální přisávání vzduchu. V sekci *Mesh* jsem volil vhodné nastavení sítě a poté byl příkazem *Generate* proveden výpočet sítě. vytvoří v programu ANSYS WORKBENCH v sekci MESH. Nastavení sítě má velký vliv na následné provedení výpočtů, proto je třeba zvolit správně maximální a minimální velikosti elementů.

Nastavení sítě pro danou geometrii:

- | | |
|----------------------------|--------------|
| - maximální velikost buněk | 6,4 mm |
| - minimální velikost buněk | 0,1 mm |
| - tvar elementů | Tetrahedrons |
| - vyhlazení | Medium |

Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Smoothing	Medium
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	0.10 mm
<input type="checkbox"/> Max Size	6.40 mm
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	1.4806e-002 mm
Inflation	
Assembly Meshing	
Method	Tetrahedrons
Feature Capture	Program Controlled
Tessellation Refinement	Program Controlled
Intersection Feature Creation	Program Controlled
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	69997
<input type="checkbox"/> Elements	375972
Mesh Metric	None

Obr. 7.5 – Nastavení sítě

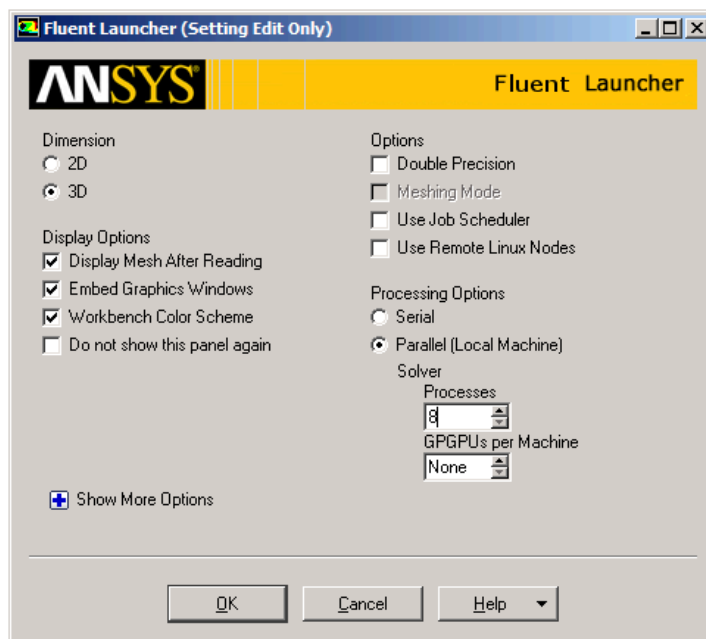


Obr. 7.6 – Vygenerovaná síť

Vygenerovaná síť je tvořena tetrahedrony a má 375 972 elementů.

7.5 Nastavení hodnot v programu Fluent

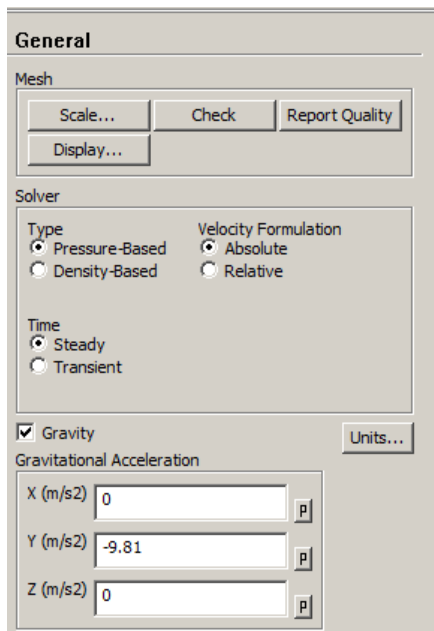
V programu ANSYS WORKBENCH jsem spustil FLUENT, program pro matematické modelování proudění. Po spuštění se zobrazí komplexní startovací nabídka, kde se dají volit různé parametry, a to ještě před samotným podrobným nastavením simulace. Já jsem nastavil v záložce *Dimensions* možnost *3D* řešené geometrie, dále jsem v *Processing Options* nastavil počet procesů na hodnotu 8. Tímto krokem se programově rozdělí výpočtová oblast na osm částí (fyzicky budou pořád propojené) a výpočet simulace proudění se tímto urychlí.



Obr. 7.7 - Nastavení FLUENT Launcheru

7.5.1 Nastavení záložky General

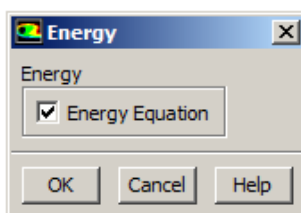
Zde jsem nastavoval hlavně působení gravitace zaškrtnutím záložky *Gravity*, zde jsem zadal gravitační zrychlení vzhledem dané ose a možnost řešení úlohy jako časově závislé (*Steady*) či nezávislé (*Transient*) v záložce *Time*.



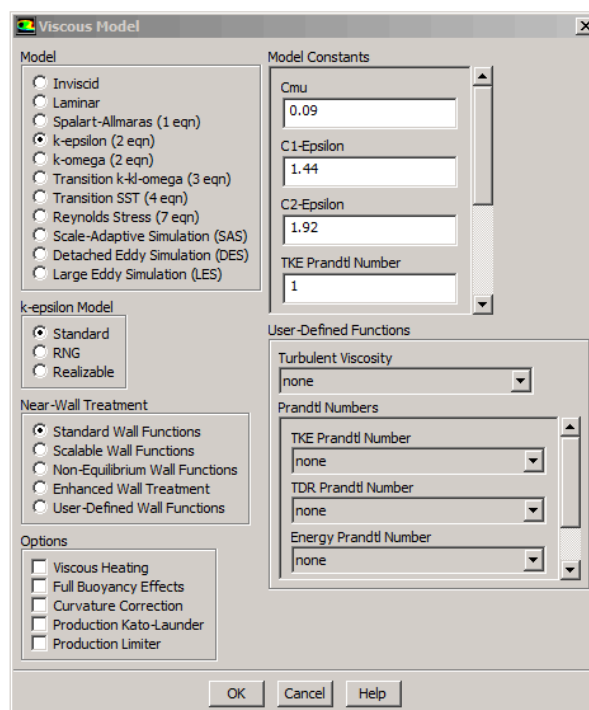
Obr. 7.8 – Nastavení General

7.5.2 Nastavení záložky Models

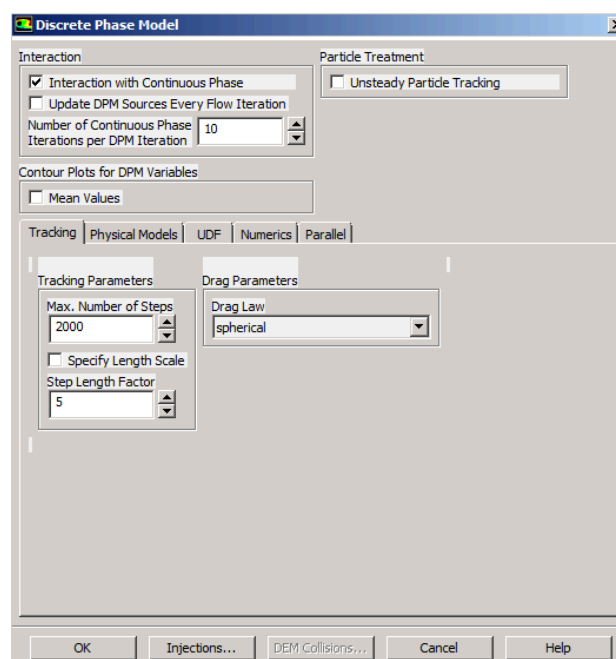
Zde jsem v záložce *Energy* zaškrtnul *Energy Equation*, a to z důvodu možnosti pozdějšího zadávání teplot při definování okrajových podmínek. Dále jsem v záložce *Viscous* nastavil turbulentní model $k - \varepsilon$ *Standart*. Důležitou roli zde hrálo nastavení diskrétní fáze v záložce *Discrete Phase*. Zde jsem zaškrtnul záložku *Interaction with Continous Phase*, aby byly ve výpočtu brány výpočty pro vstupující tuhé částice.



Obr. 7.9 – Nastavení Energy

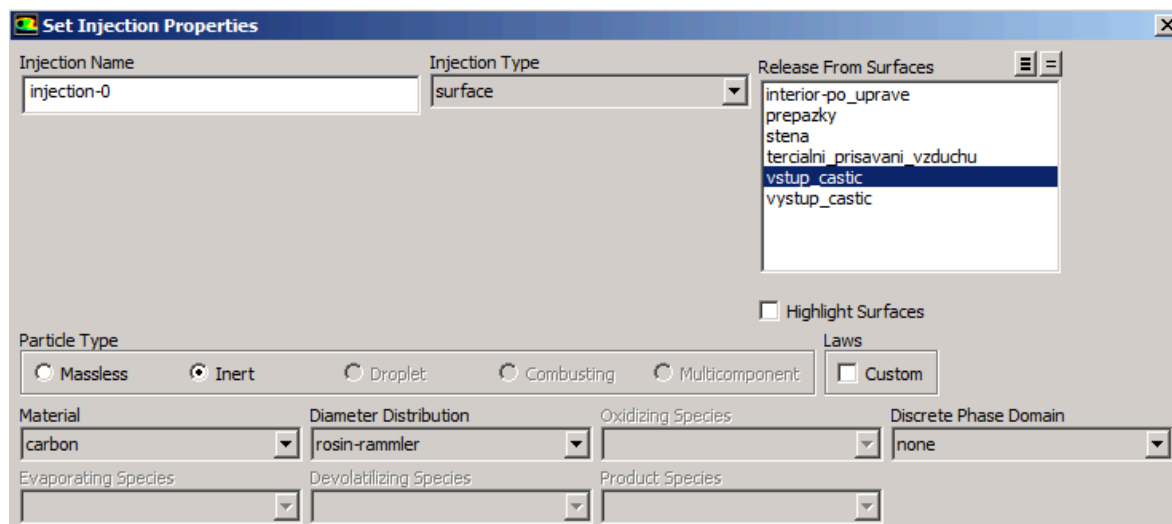


Obr. 7.10 – Nastavení Viscous



Obr. 7.11 – Nastavení Discrete Phase

Dále bylo třeba nastavit záložku *Injections*, kde jsem nastavoval vlastnosti a velikost vstupních částic. Volba druhu vstupu částic *Injection Type* a zde jsem zvolil *surface* – plocha. V záložce *Release From Surfaces* jsem zvolil vstupní plochu *vstup_castic*. Typ částic jsem volil *Inert*, protože se jedná o pevné částice. Materiál jsem volil uhlík – carbon a *Diameter Distribution* jsem zvolil rozdělení průměrů zrn podle Rosin-Rammlera.



Obr. 7.12 – Nastavení Injections

V záložce *Point Properties* jsem zadal maximální a minimální velikost částic. Tyto hodnoty byly zadány. Dále byla volena vstupní rychlost částic v ose z . Počet průměrů, na které se rozdělí částice dle Rosin-Ramlerovy funkce jsem zvolil 15.

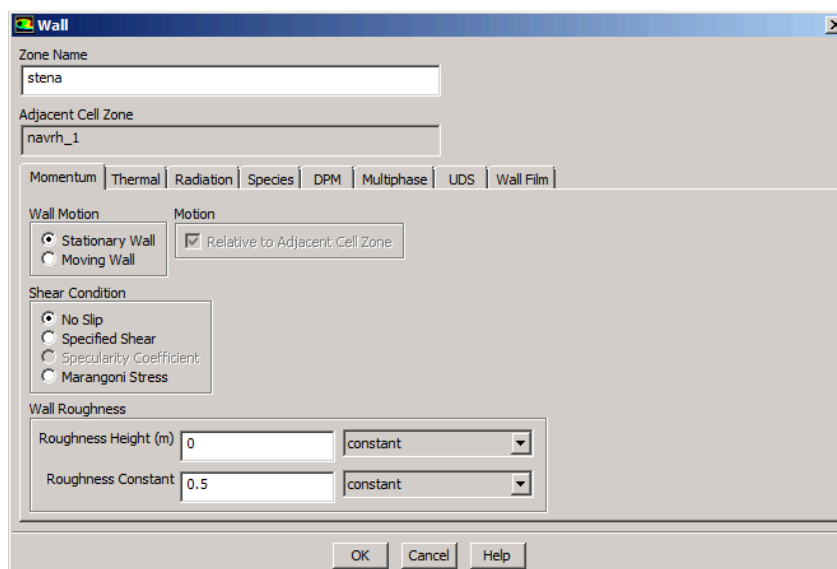
Variable	Value	Min. Diameter (m)	Value
X-Velocity (m/s)	0	Max. Diameter (m)	0.0003
Y-Velocity (m/s)	0	Mean Diameter (m)	3.5e-05
Z-Velocity (m/s)	-1	Spread Parameter	2.5
Temperature (K)	700	Number of Diameters	15
Total Flow Rate (kg/s)	0.00015		

Obr. 7.13 – Nastavení samotných částic

7.5.3 Nastavení záložky BoundaryConditions

Stěna

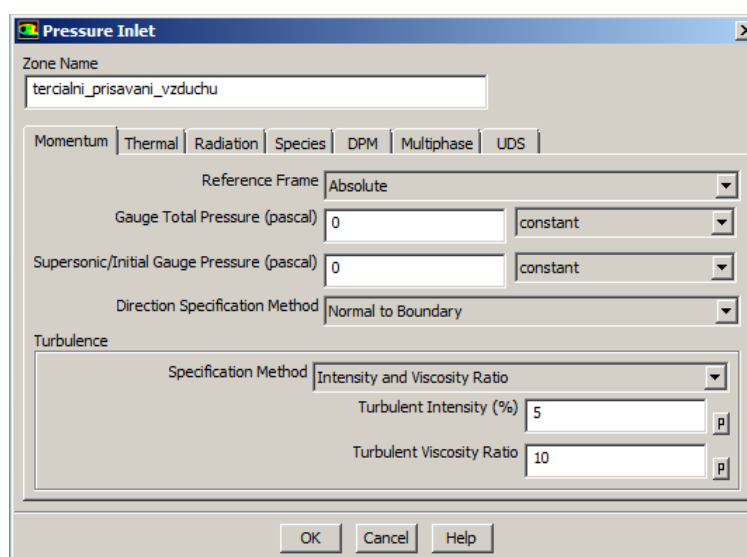
Pro tuto oblast jsem zvolil okrajovou podmínku typu *Wall*. V záložce *DPM* jsem volil okrajovou podmínku *reflect*. Jinak jsem pro tuto podmínku zvolil základní nastavení.



Obr. 7.14 –Nastavení pro oblast proudění

Terciální přisávání vzduchu

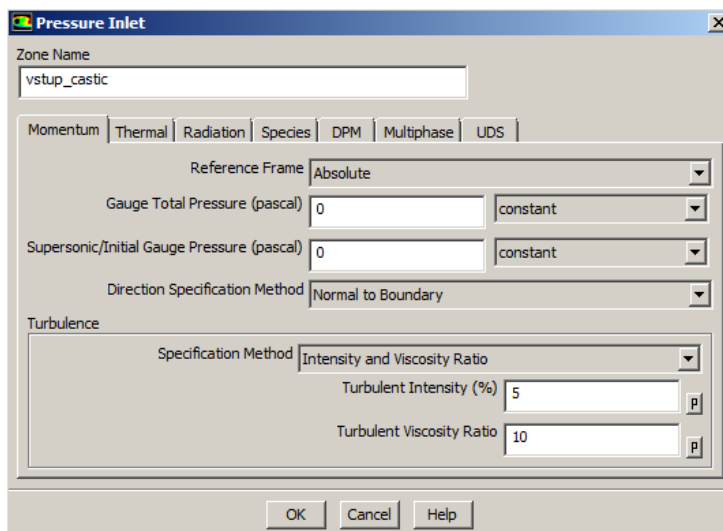
Pro tuto oblast jsem volil okrajovou podmínku *Pressure Inlet*. Zde jsem nastavil nulový přetlak, čili vstupní tlak je roven atmosférickému tlaku. V záložce *Thermal* jsem nastavil hodnotu vstupního média na teplotu 300 K . V záložce *DPM* jsem nastavil podmínku *escape*, která zapříčiní ukončení výpočtu trajektorií dané částice.



Obr. 7.15 – Nastavení přisávání vzduchu

Vstup částic

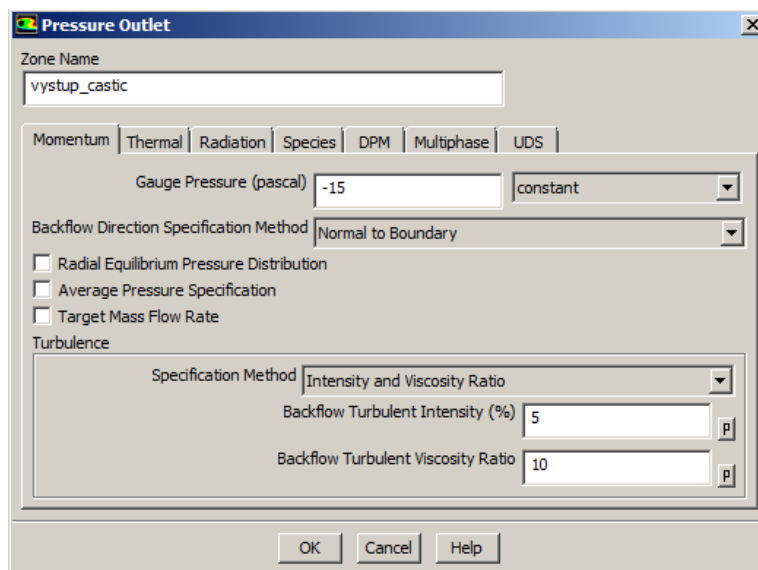
Pro tuto oblast jsem volil okrajovou podmínku *Pressure Inlet*. Jako počáteční vstupní tlak bylo dáno $p_0=0$ Pa, tedy tlak atmosférický. V záložce *Thermal* jsem nastavil hodnotu teploty 700 K, abych se přiblížil k reálnému prostředí spalín. V záložce *DPM* jsem nastavil hodnotu *escape*, která zapříčiní ukončení výpočtu trajektorií dané částice.



Obr. 7.16 – Nastavení vstupu částic

Výstup částic

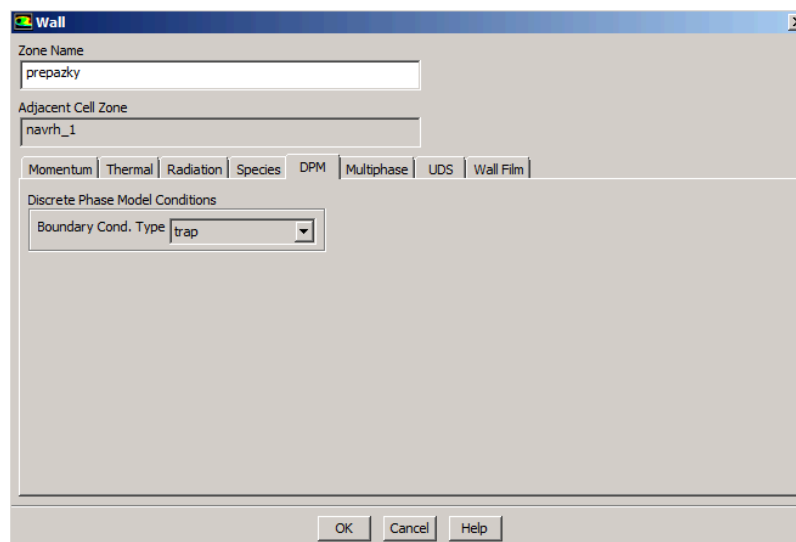
Pro tuto oblast jsem volil okrajovou podmínku *Pressure outlet*. Jako výstupní tlak bylo zadáno $p = -15$ Pa. Tato hodnota byla poskytnuta zadavatelem práce. V záložce *Thermal* jsem nastavil hodnotu teploty 700 K, abych se přiblížil k reálnému prostředí spalín. V záložce *DPM* jsem nastavil hodnotu *escape*, aby byly částice při kontaktu s touto okrajovou podmínkou vyloučeny z výpočtu trajektorií.



Obr. 7.17 – Nastavení výstupu částic

Přepážky

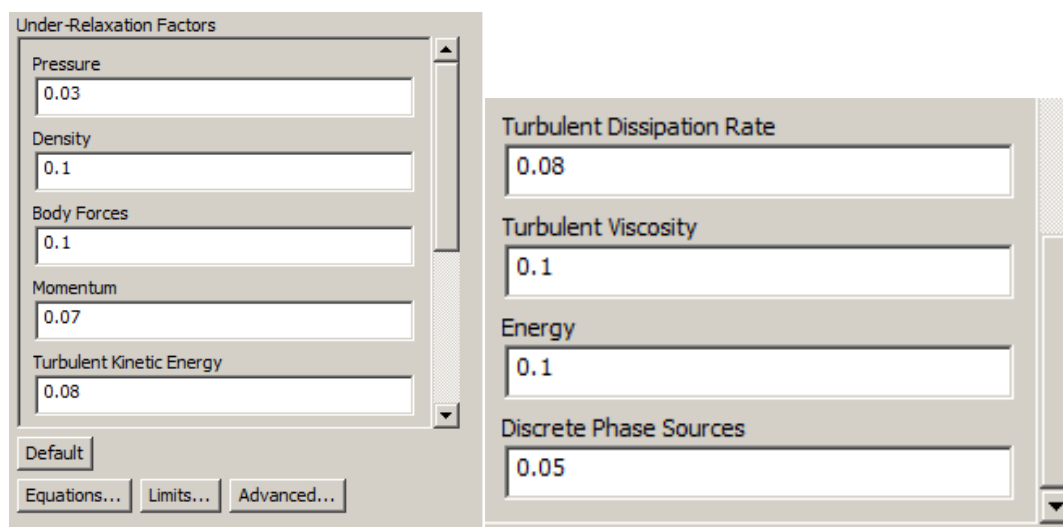
Pro tuto oblast jsem zvolil okrajovou podmínku typu *Wall*. V záložce *DPM* jsem volil okrajovou podmínku *trap*. Jedná se jen o části této přepážky, kde se rychlost proudění částečně uklidňuje a může zde docházet k usazování pevných částic. Jinak jsem pro tuto podmínku zvolil základní nastavení.



Obr. 18 – Nastavení okrajové podmínky na přepážkách

7.5.4 Nastavení záložky Solution Controls

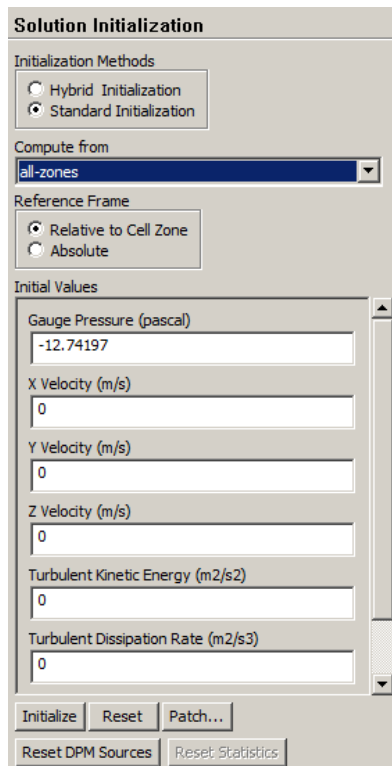
V této kategorii lze nastavovat relaxační parametry. Během výpočtu je možné tyto parametry měnit v závislosti na průběhu výpočtových parametrů. Já jsem tyto relaxační parametry upravil a to tak, že jsem u všech hodnot posunul desetinou čárku směrem doleva.



Obr. 7.19 – Nastavení relaxačních parametrů

7.5.5 Nastavení záložky Solution Initialization

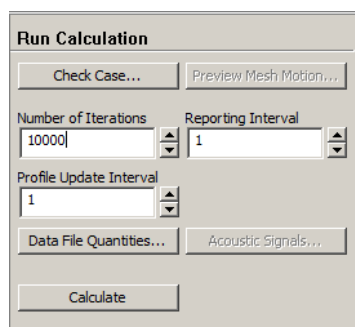
Tato záložka slouží k načtení a ověření vstupních parametrů před spuštěním samotného výpočtu. Pokud zde nesedí nějaké hodnoty, je třeba je znovu překontrolovat a poté opět provést inicializaci.



Obr. 7.20 – Nastavení inicializace

7.5.6 Spuštění simulace

Nastaveny byly všechny okrajové podmínky a inicializace výpočtové oblasti. Poté jsem pomocí záložky *Run Calculation* nastavil počet iterací na hodnotu 10000 a spustil výpočet tlačítkem Calculate. Je důležité dostat při simulaci konvergenční řešení a to z důvodu dosažení co největší přesnosti výsledků. Residuály, čili průběh výpočtu, jsou vyhodnocovány pro každou počítanou veličinu v každém kroku iterace a zobrazovány jsou pro vybrané veličiny.



Obr. 7.21 – Nastavení počtu iterací

8. Vyhodnocení výsledků

Dle zadání byla pro danou geometrii provedena simulace proudění vzduchu. Následně byly navrženy čtyři geometrie, pro které byly sestaveny matematické modely. Pro tyto modely byly zadány stejné vstupní hodnoty a okrajové podmínky, pro které byla simulována zadaná geometrie.

Jako jedna z doplňujících, ale důležitých hodnot, byla porovnávána tlaková ztráta na odlučovači. Tato hodnota byla vyhodnocena z výsledků simulace a to v programu Fluent.

Výsledné tlakové hodnoty jsou vyhodnoceny v záporných hodnotách, protože byl na okrajové podmínce pro výstup nastaven podtlak. Je tedy nutné výsledný rozdíl tlaků vyhodnotit jako absolutní hodnoty tlaků.

Average of Facet Values Static Pressure (pascal)	
vstup_castic	-5.7475824
vystup_castic	-15.028727
Net	-14.139588

Obr. 8.1 – Odečtení výsledných tlaků

$$\Delta p = |vystup_{castic}| - |vstup_{castic}| = |-15,0287| - |-5,7475| = 9,28 \text{ Pa} \quad (8.1)$$

Dále byla z důvodu kontroly zjišťována výsledná vstupní rychlost. Pokud by tato rychlost dosahovala hodnot okolo $v_1 = 1 \text{ m/s}$, bylo by nutné upravit výstupní okrajovou podmínku a nastavit vyšší podtlak. Jedná se totiž o část kotle na tuhá paliva a nižší rychlosti by způsobovaly dušení ohně a nedokonalé spalování.

Average of Facet Values Velocity Magnitude (m/s)	
vstup_castic	3.0612714

Obr. 8.2 – Odečtená vstupní rychlost

Následně byla vyhodnocena orientační účinnost odlučovače a to z výsledků simulované diskrétní fáze na dané geometrii. Účinnost byla určena odečtením výsledných hodnot hmotnostních průtoků z programu Fluent. Tato hodnota byla zjištěna z poměru množství částic, které zůstaly v odlučovači a množství částic na vstupu do odlučovače. Tedy:

$$\eta_o = \frac{Incomplete + Trapped}{Net} \cdot 100\% = \frac{1,075 \cdot 10^{-5} + 2,957 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\% = 28,6\%. \quad (8.2)$$

Fate	Mass Flow (kg/s)		Change
	Initial	Final	
-----	-----	-----	-----
Incomplete	4.075e-05	4.075e-05	0.000e+00
Trapped - Zone 11	2.957e-06	2.957e-06	0.000e+00
Escaped - Zone 7	1.063e-04	1.063e-04	0.000e+00
-----	-----	-----	-----
Net	1.500e-04	1.500e-04	0.000e+00

Obr. 8.3 – Odečtené hodnoty množství částic

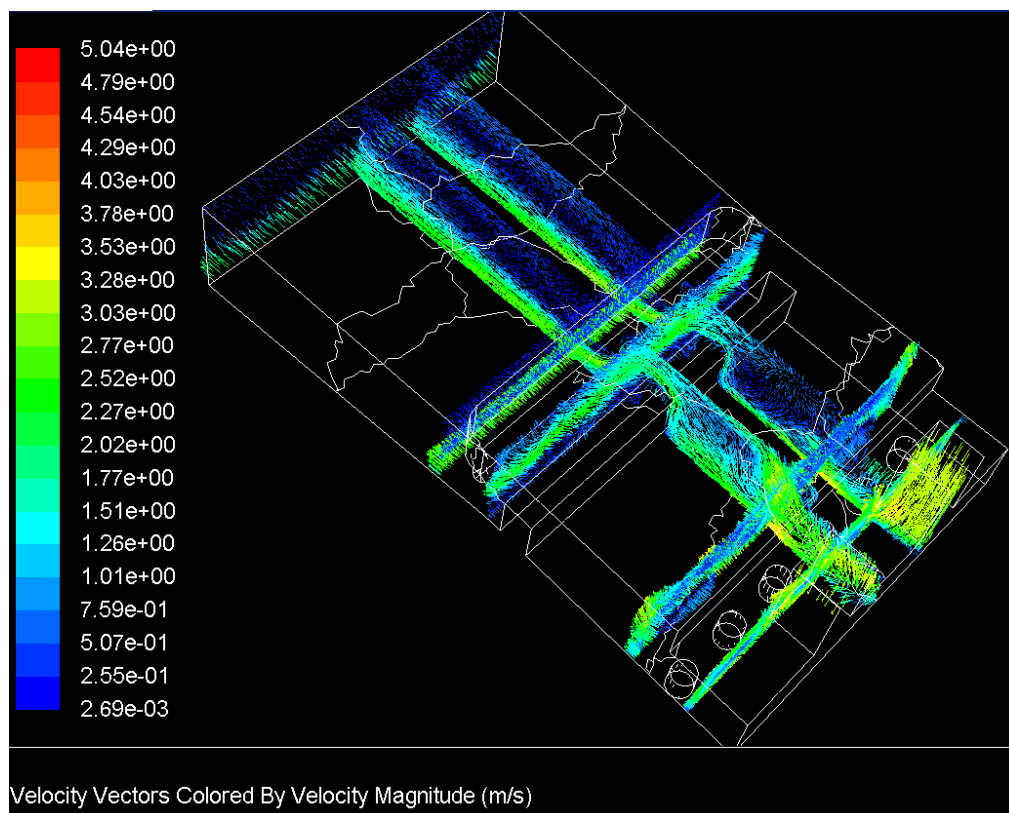
Je ovšem nutno podotknout, že cílem této práce bylo (dle zadání) simulovat proudění vzduchu v zadané geometrii a dalších návrzích. Proto je třeba brát tyto hodnoty jako doplňující orientační informace, zpracované k této práci.

Geometrie	Tlakový spád	Rychlost na vstupu	Účinnost
	[Pa]	[m/s]	[%]
Zadaná geometrie	9,28	3,06	28,6
Návrh_1	7,71	3,21	16,8
Návrh_2	9,1	2,9	57,6
Návrh_3	10,08	2,83	43,3
Návrh_4	8,75	3,22	54,6

Tab. 8.1 – Tabulka výsledných hodnot dle simulací

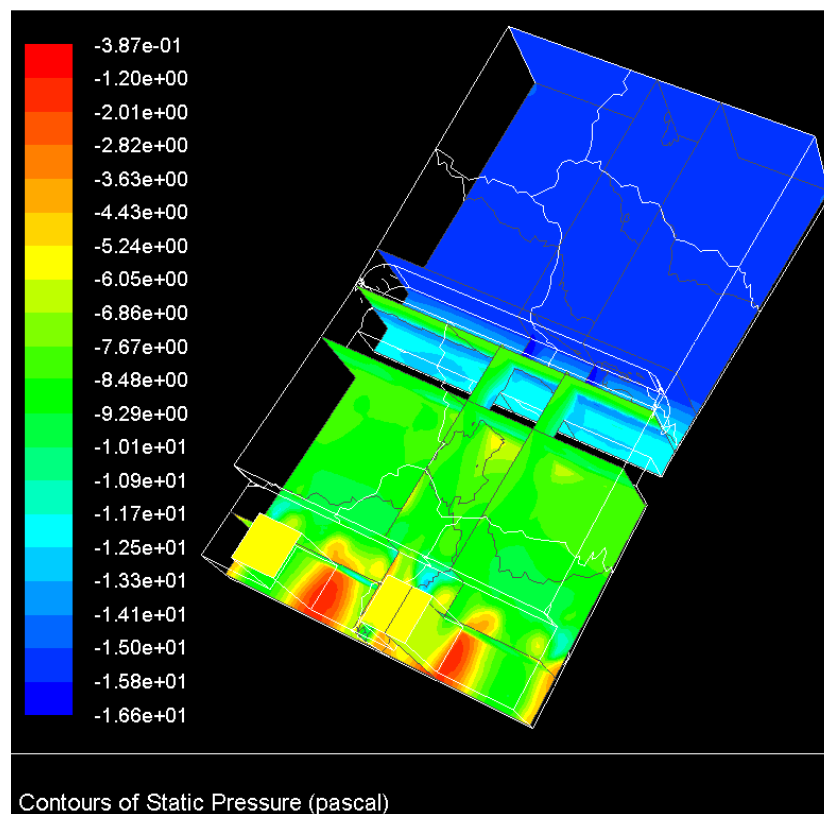
8.1 Grafické porovnání výsledných hodnot ze simulací

Vyhodnocení rychlostního pole zadané geometrie



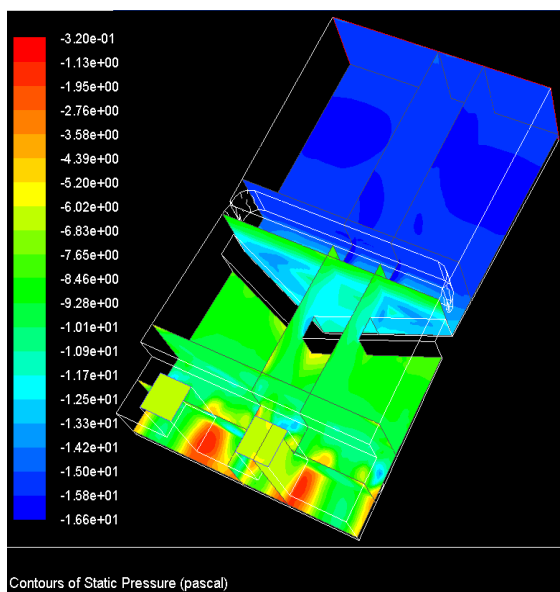
Obr. 8.4 – Vyhodnocení rychlostního pole zadané geometrie

Vyhodnocení kontur statického tlaku

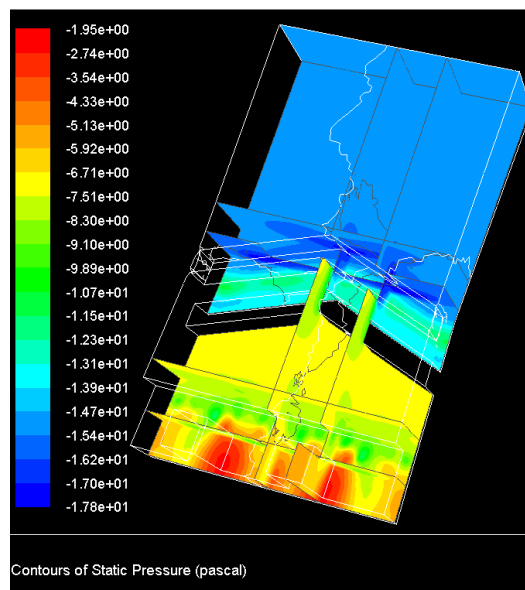


Obr. 8.5 – Vyhodnocení statického tlaku zadané geometrie

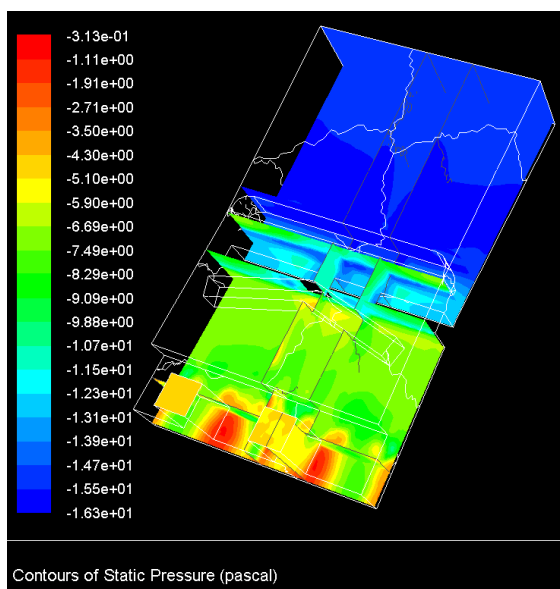
Srovnání kontur statického tlaku navržených geometrií



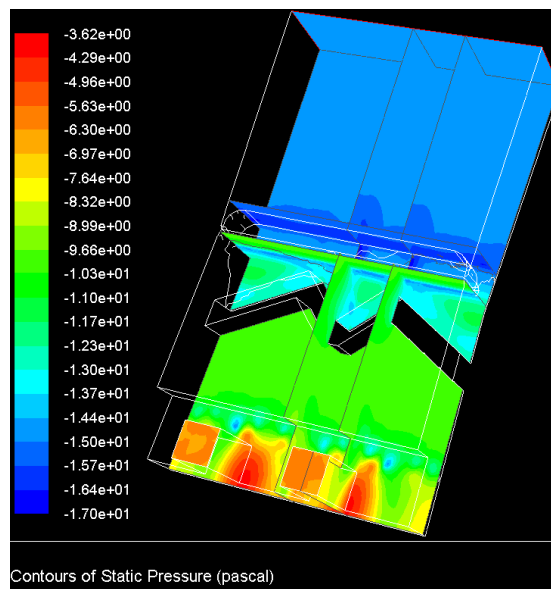
Návrh 1



Návrh 2



Návrh 3

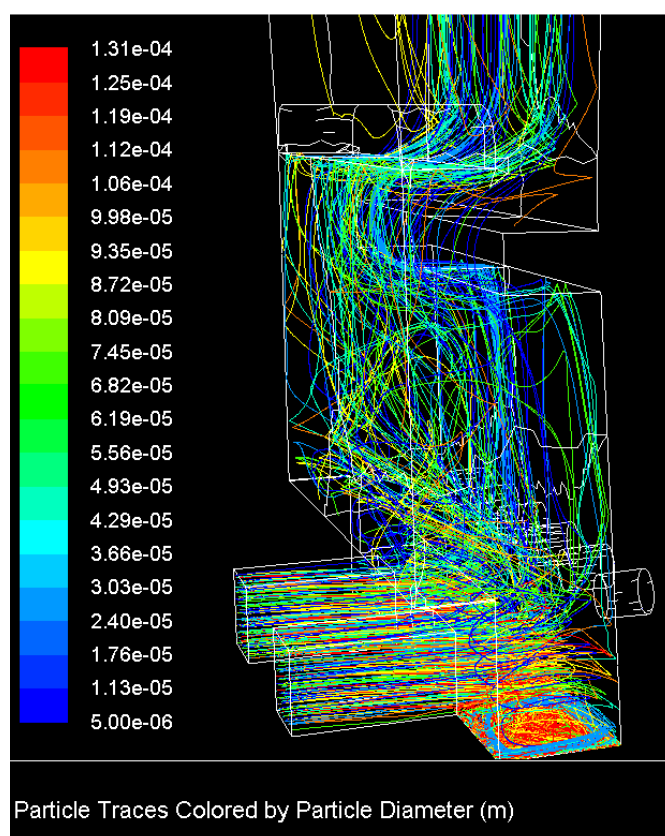


Návrh 4

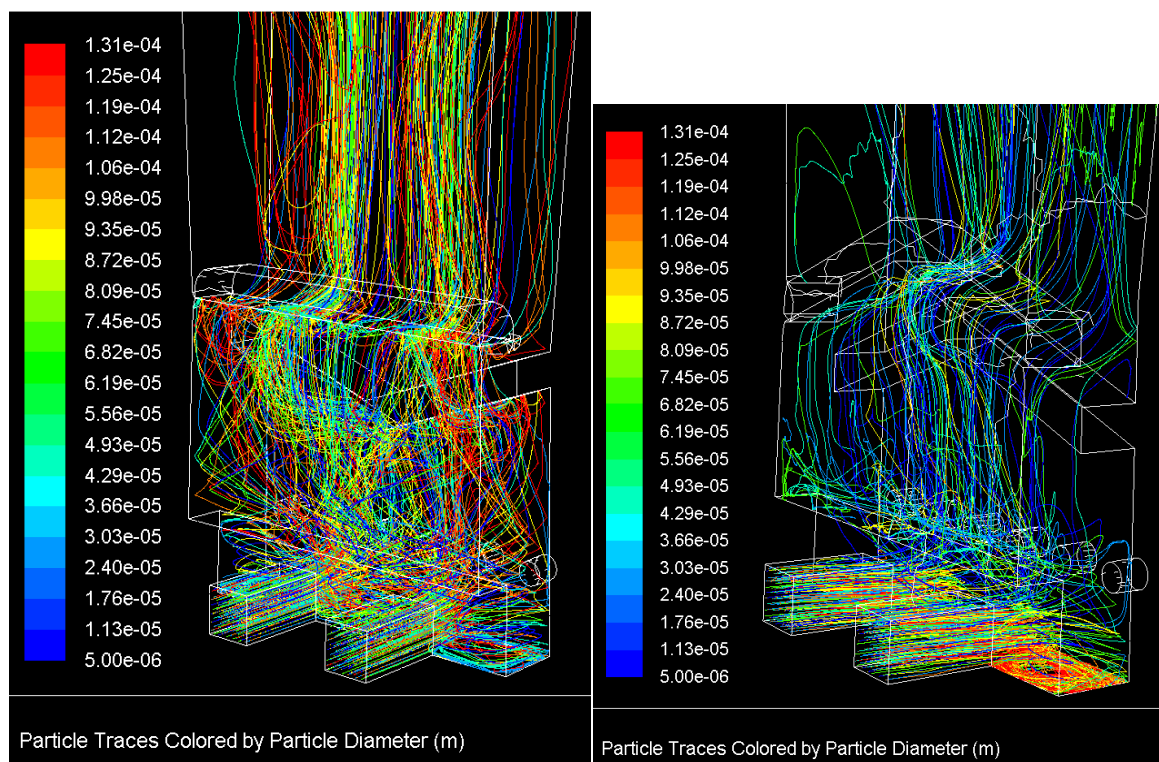
Obr. 8.5 – Porovnání statického tlaku mezi navrženými geometriemi

Dle výše uvedených porovnání kontur statického tlaku v geometriích lze sledovat tlakové rozdíly mezi každou z těchto navržených geometrií. Odlišně rozmístěné a tvarované přepážky zapříčinily tlakové změny v odlučovači, které lze sledovat v promítnutých rovinách zobrazených návrhů. Lze zřetelně pozorovat změny tlaků v blízkosti přepážek, zejména pak v dolní oblasti, kde se mísí vstup spalin se vstupem terciálního přívodu vzduchu. Největší tlakové ztráty lze sledovat u Návrhu 1 a Návrhu 3, kde se hodnoty tlaku zobrazené červenou barvou pohybovaly velmi blízko hranici tlaku atmosférického.

Vyhodnocení trajektorie částic různých průměrů



Obr. 8.6 – Vyhodnocení průměrů částic v zadané geometrii

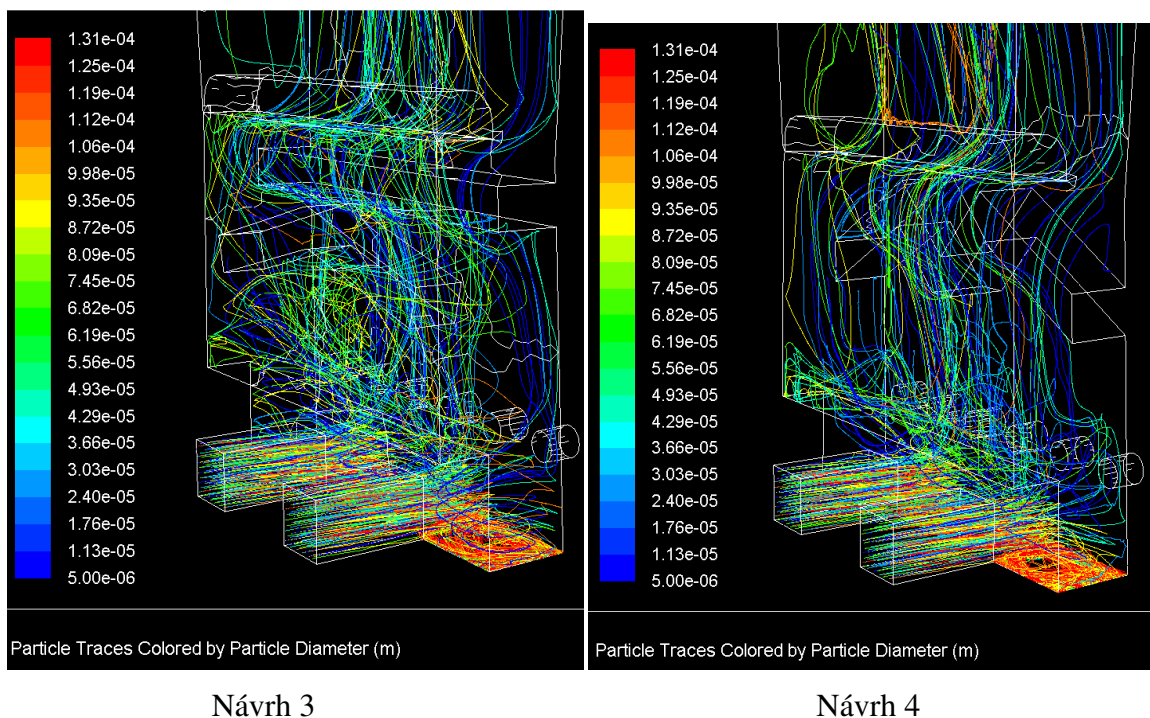


Návrh 1

Návrh 2

Obr. 8.7 – Porovnání průměrů částic

U prvního návrhu je zřejmé větší rozvření částic než u druhého návrhu. Hlavní roli zde hraje velikost mezery mezi přepážkami, která u Návrhu 1 zapříčinila snížení hodnoty tlakové ztráty a zvýšení rychlosti na vstupu do tvarovky. To více rozvířilo částice, které se ještě nestačily usadit na dně a zvětšenou mezerou byly tyto částice snadněji propuštěny.



Obr. 8.8 – Porovnání průměru částic

Do návrhu třetí geometrie byla přidána další přepážka, která zapříčiňuje odlišnou změnu trajektorií částic. Sice došlo dle výsledků z Tab. 8.1 ke zvýšení odlučivosti, avšak také značně narostla i tlaková ztráta a to by mohlo mít za následek přílišné dušení kotle. Změna tvaru a posunutí přepážky více směrem dolů mělo u Návrhu 4 také výborné výsledky simulací. Odlučivost částic dosahovala téměř 55% a to dokonce při nižší tlakové ztrátě nežli u Návrhu 2.

Závěr

V této práci byly řešeny simulace proudění spalin v geometrii, kterou poskytl zadavatel. Po sestavení matematického modelu a jeho matematické simulaci, byly navrženy úpravy oproti zadané geometrii. Pro tyto návrhy byly rovněž vytvořeny a simulovány matematické modely.

Úvodem této práce byly zpracovány různé metody úpravy spalin a možnosti čištění odstranění nežádoucích látek ze spalin. Každý z těchto zmíněných způsobů se však ve většinové míře využívá pro velké objemové průtoky v průmyslové výrobě, např. teplárny, ocelárny, hutě atd. Pro odstranění nežádoucích částic ze spalin pro lokální topeniště tedy zbývá pouze jeden z těchto zmíněných způsobů úpravy, a to suché mechanické odlučování. Kdy se pomocí gravitačních sil a sil vztakových částice separují.

Pro numerické výpočty proudění byl použit software ANSYS Fluent, který umožňuje vyhodnocení parametrů statického tlaku, vstupních a výstupních rychlostí, grafických vyhodnocení pomocí kontur či rychlostního pole, atd. V programu Mesh Designer byla vytvořena čtyřúhelníková nestrukturovaná síť s celkovým počtem 380 000 buněk. Pro výpočet proudění v zadané geometrii byl použit nejvhodnější výpočtový model $k - \varepsilon$ *standart*. Model je vhodný při vysokých hodnotách Reynoldsova čísla, která nabývají vysokých hodnot při simulacích proudění plynných látek.

Na výstupu z tvarovky byl zadán podtlak 15 Pa. Tento podtlak způsobuje ve tvarovce změny rychlosti proudění a to jak na vstupu, na terciálním přisávání vzduchu, tak také v prostoru mezi přepážkami. Následně byla vypočtena varianta se zadanými přepážkami dle zadavatele. V simulaci nebylo počítáno s přenosy tepla na stěny tvarovky, a proto byla zanedbána i teplotní ztráta mezi vstupem a výstupem. Byla tedy stanovena konstantní teplota spalin 700 K. Na základě výsledků simulace zadané geometrie byly také spuštěny simulace pro navržené geometrie. Pro tyto návrhy byly nastaveny zcela stejné okrajové podmínky, jako pro výpočet zadané geometrie. Výsledné hodnoty tlakových ztrát, změn rychlostí na vstupech a účinnost odloučení částic jsou znázorněny v Tab. 8.1. Výše pak bylo popsáno, jak byly tyto hodnoty zjištěny.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo na geometrii Návrh 2, kde vyšel nižší tlakový spád na tvarovce, a při mírném poklesu vstupní rychlosti bylo dosaženo dvojnásobné účinnosti odloučení částic oproti zadané geometrii.

LITERATURA

- [1] Odprašování odpadních plynů [online], [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchop/velebudice/ovzdusi/odprasovani.htm>
- [2] Vírové odlučovače [online], [cit. 2014-02-06] Dostupné z : http://knc.czu.cz/~vachm/ovzdusi/o_em_odl2.html
- [3] NIEWSTADT, F.T.M. et al. *Direct and Large Eddy simulationsof turbulence in fluids*. Future Generation Computer System, 1994, p. 189-205
- [4] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin – Fluent. CFX*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.,
<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [5] NOVÝ, R. a kol.: *Technika prostředí* (skripta). Praha : ČVUT, 2000.
ISBN 80-01-02108-4
- [6] HEMERKA, J. : *Odlučování tuhých částic* (skripta). Praha : ČVUT, 1994.
ISBN 80-01-01088-0
- [7] MAMICA, M. *Modelování proudění v článku kotle*. (Diplomová práce). Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011. 64 s.
- [8] BLEJCHAŘ, T. : *Matematické modelování nestacionárního proudění, kavitace a akustických projevů v hydraulickém ventilu* (Disertační práce). Ostrava : VŠB TU Ostrava, 2006, 114 s.
- [9] *ANSYS CFX. Ansys Inc. CFX 14.0, Release 14.0: Dokumentace k programu*
- [10] DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 257 s.
- [11] BOJKO, M. *3D Proudění – ANSYS Fluent*, e-learningová skripta, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010 226 s.
<http://www.338.vsb.cz/PDF/3D-Proudeni-ANSYS-Fluent.pdf> >
- [12] BLEJCHAŘ, T. *Turbulence-Modelování proudění – CFX*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 263s. http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf
- [13] PRÍHODA, J., LOUDA, P. *Matematické modelování turbulentního proudění*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 111s., ISBN 978-80-01-03623-5.
- [14] DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 257 s.
- [15] Aireko Plus s.r.o. , *Odlučování popílků* [online], [cit. 2014-02-06], Dostupné z : http://www.aireko.cz/sluz_odluc.php
- [16] Variabilita vlastností různých druhů popílků [online], [cit. 2014-04-12], Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/4.1/Cerny_Vit_CL.pdf

- [17] ZAPLETALOVÁ, L., *XRF produktů spalování uhlí*. (Diplomová práce) Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2008, 64 str.
- [18] HERČÍK, M., LAPČÍK. V, *Ochrana životního prostředí*, 1. vydání VŠB-TU Ostrava:, 1993, 200 s.
- [19] Fly Ash [online], [cit.2014-05-14], Dostupné z:http://en.wikipedia.org/wiki/Fly_ash
- [20] Descrete Phase Model [online], [cit. 2014-05-14], Dostupné z:
http://www.ualberta.ca/~seyedsha/pirouz/multiphase/fluent-adv-multiphase_13.0_L06_dpm.pdf
- [21] Modeling of an Air-Based Density Separator[online], [cit.2014-05-14], Dostupné z: http://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=mng_etds

Přílohy

Příloha č. 1 Výkresy se základními rozměry odlučovače a rozmístění přepážek:

- JAW244_001
- JAW244_002
- JAW244_003
- JAW244_004
- JAW244_005

Příloha č. 2 CD

- JAW244_FS_N2301_3909T001_2014.docx
- přílohy